

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



T E S I S

**CONTROL PREDICTIVO DIRECTO DE PAR USANDO INVERSORES
MULTI-NIVEL APLICADO A MÁQUINAS DE INDUCCIÓN**

POR

ING. GUILLERMO IVAN OLAY REYES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA**

MARZO, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



T E S I S

**CONTROL PREDICTIVO DIRECTO DE PAR USANDO INVERSORES
MULTI-NIVEL APLICADO A MÁQUINAS DE INDUCCIÓN**

POR

ING. GUILLERMO IVAN OLAY REYES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA**

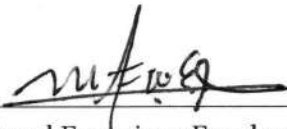
Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

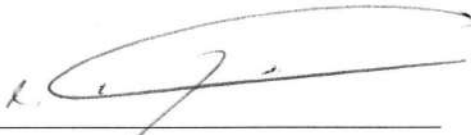
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Control predictivo directo de par usando inversores multi-nivel aplicado a máquinas de inducción», realizada por el alumno Ing. Guillermo Ivan Olay Reyes, con número de matrícula 1887253, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Tesis



Dr. Miguel Francisco Escalante Gutiérrez

Asesor



Dr. Alberto Cavazos González

Revisor



Dr. Oscar Salvador Salas Peña

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 13 marzo del 2019

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado principalmente a mi abuela Leticia y a mi tía Dolly que siempre fueron un gran ejemplo en mi vida y un modelo a seguir, siempre las llevare en mi corazón.

A mis padres Leticia y Guillermo que son la razón de que hoy pueda citar estas palabras, ya que su apoyo y amor incondicional son el pilar fundamental en todos mis logros conseguidos hasta este momento.

A mis hermanos Gerardo y Edgardo que siempre han estado presentes con su apoyo y cariño me alienta día con día a no desistir en cada una de las metas y retos presentes.

A mis tíos Martha y Miguel que en esta etapa de mi vida me han brindado su gran amor y apoyo.

A mis amigos Omar, Roberto, Sergio y Xóchitl que a pesar de la distancia siempre e recibido su apoyo, consejos y una gran muestra de amistad.

A todos mis maestros, por su apoyo y motivación durante mi formación profesional.

Agradecimientos

A mis padres Leticia y Guillermo gracias por su amor incondicional.

A mis hermanos Gerardo y Edgardo que a pesar de los buenos y malos momentos siempre han estado apoyándome en cada etapa de mi vida.

A mis tíos Martha y Miguel me han brindado un gran amor y apoyo en esta nueva etapa de mi vida.

A mis amigos Omar, Roberto, Sergio y Xóchitl que gracias a sus consejos y su gran amistad me ha servido para seguir adelante y lograr mis objetivos.

A mi abuelo Guillermo que siempre ha sido un gran ejemplo a seguir.

A mi compañero Enrique que a pesar de diferencias en ámbitos laborales siempre e recibido un gran apoyo.

A mi asesor Dr. Miguel muchas gracias por guiarme en la escritura de este trabajo.

Gracias a todos.

RESUMEN

Publicación No. _____

Nombre del Alumno: Guillermo Iván Olay Reyes

M.C. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 13 de marzo del 2019

Profesor asesor: Dr. Miguel Francisco Escalante Gutiérrez

El control directo de par (DTC) es una técnica de control muy aceptada a nivel industrial para el control de máquinas eléctricas de corriente alterna de media y alta potencia. Entre sus características relevantes se tiene su excelente respuesta dinámica, eliminación del proceso de modulación y una buena robustez ante incertidumbre paramétrica del sistema. Por otra parte, los convertidores multinivel son actualmente la mejor opción para aplicaciones en media y alta tensión; es por eso que se pueden emplear ventajosamente en aplicaciones de control directo de par en media y alta potencia. Sin embargo, la complejidad del esquema de control aumenta - al existir un mayor número de vectores de tensión, el proceso de selección se vuelve mucho más complicado, además de que se debe controlar simultáneamente las variables internas del convertidor multinivel (i.e. tensiones de condensadores que sirven para definir los diferentes niveles de tensión disponibles).

En este sentido, el control predictivo basado en modelo (MPC) con un número finito de entradas (FCS-MPC) ofrece una metodología de control que se adapta bien a la naturaleza híbrida del sistema formado por el convertidor estático multinivel y la máquina de inducción. Este enfoque se basa en evaluar la respuesta de las variables de interés ante todas las entradas posibles y entonces seleccionar la entrada que mejor convenga a los objetivos de control. Además, permite tomar en cuenta restricciones adicionales que difícilmente se podrían incorporar en otros esquemas de control. Sin embargo, a medida que aumenta el número de niveles de tensión del convertidor el proceso puede volverse muy demandante computacionalmente.

En este trabajo de tesis se estudia un esquema de control directo de par (DTC) en una máquina de inducción alimentada por un convertidor estático de tipo multinivel. Para ello se emplea una metodología de control FCS-MPC y se propone un esquema eficiente para la selección de vectores (reducción del costo computacional). El desempeño del esquema MPC se evalúa a través de simulaciones numéricas. Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software Matlab / Simulink.

Esta tesis está estructurada en cinco capítulos, en el primer capítulo se hace un estudio bibliográfico de los trabajos previos relacionados con el tema de investigación, realizando una síntesis de sus desarrollos y las conclusiones a las que llegaron, también se plantean las hipótesis, además de los objetivos principales y conclusiones preeliminares de este trabajo.

En el capítulo dos, se presenta el esquema de control FCS-MPC, donde se explican los requerimientos para su implementación. Después se presenta una sección acerca del motor de inducción donde se plantean las ecuaciones matemáticas que modelan el comportamiento del sistema; posteriormente se desarrolla el modelo discreto de este sistema. Al final, se valida el modelo discretizado y se compara con el modelo continuo. Después se da una breve explicación acerca del funcionamiento de los inversores multinivel y su modelado vectorial. Finalmente se presenta el problema de control en la máquina de inducción.

En el capítulo tres, se presenta la implementación del FCS-MPC en la máquina de inducción alimentada por inversores de 2, 3, 4 y 5 niveles, realizando pruebas con diferentes objetivos de control.

En el capítulo cuatro, se implementará la propuesta para la reducción de cálculos computacionales, que toma como enfoque evaluar diferentes subconjuntos de vectores y eliminación de estados redundantes, finalmente se realizan pruebas y se analizan los resultados.

En el capítulo cinco, se presentan las conclusiones generales acerca de este trabajo, se hace un

resumen de las aportaciones, y se plantean algunos trabajos que pudieran realizarse con base en el trabajo expuesto en esta tesis.

Índice General

Resumen	VIII
Índice de Figuras	XII
Índice de Tablas	XXIX
Lista de Símbolos	XXXIII
1. Planteamiento del problema y antecedentes	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	2
1.3. Antecedentes	3
1.4. Objetivos	7
1.5. Hipótesis	7
1.6. Estructura de la tesis	8
1.7. Conclusiones	9
2. Control FSC-MPC de la máquina de inducción	11
2.1. Introducción	11
2.2. Sistema de Control MPC	12
2.3. Control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas FCS-MPC	13
2.3.1. Modelo de predicción	14
2.3.2. Horizonte de predicción	14
2.3.3. Función de Costo	14
2.4. Modelado de la máquina de inducción	16
2.4.1. Modelo continuo de la máquina de inducción	16

2.4.2. Modelo discreto de la máquina de inducción	19
2.4.3. Validación del modelo discreto de la máquina de inducción	21
2.5. Convertidores de potencia multi-nivel	26
2.5.1. Representación vectorial	27
2.6. Problema de control en la máquina de inducción	29
2.7. Conclusiones	31
3. Control FCS-MPS aplicado a la máquina de inducción	32
3.1. Introducción	32
3.2. Implementación del control FSC-MPC	33
3.3. Pruebas realizadas	35
3.3.1. Prueba 1.- Tren de par	35
3.3.2. Prueba 2.-Inversión de par	48
3.3.3. Prueba 3.- Tren de Velocidad	62
3.4. Conclusiones	75
4. Estrategias para reducir el costo computacional	76
4.1. Introducción	76
4.2. Reducción de tiempo de computo	77
4.2.1. Eliminación de estados redundantes	77
4.2.2. Selección de un subconjunto de vectores	78
4.3. Pruebas	84
4.3.1. Prueba 1.-Tren de par implementando reducción computacional sin flujo en estator al inicio	84
4.3.2. Prueba 2.-Tren de par implementando reducción computacional con flujo nominal antes de un cambio de referencia del par	101
4.3.3. Prueba 3.-Tren de par implementando reducción computacional con factor de peso en el flujo del estator	116
4.3.4. Prueba 4.-Inversión de sentido de giro	130
4.3.5. Prueba 5.- Tren de Velocidad	146

4.3.6. Prueba 6.- Tren de Velocidad con factor de peso en el salto de nivel	160
4.3.7. Prueba 7.- Tren de Velocidad con incertidumbre en parámetros del sistema .	174
4.4. Conclusiones	189
5. Conclusiones y recomendaciones	195
5.1. Conclusiones	196
5.2. Aportaciones	198
5.3. Recomendaciones para trabajos futuros	199
A. Inversores multinivel	200
A.1. Inversor 2 niveles	200
A.2. Inversor 3 niveles	202
A.3. Inversor 4 niveles	204
A.4. Inversor 5 niveles	208
Bibliografía	218

Índice de figuras

2.1. Diagrama de control general.	12
2.2. Diagrama de control general aplicando FCS-MPC.	13
2.3. Par mecánico de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 100\mu s$	22
2.4. Detalle del par mecánico de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 100\mu s$	22
2.5. Flujo en el estator de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discre- to con un $T_s = 100\mu s$	23
2.6. Par mecánico de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 50\mu s$	24
2.7. Detalle del par mecánico de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 50\mu s$	24
2.8. Flujo en el estator de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discre- to con un $T_s = 50\mu s$	25
2.9. Diagrama funcional de un convertidor de n-niveles.	26
2.10. Forma de onda escalonada de n-niveles de tensión.	27
2.11. Transformación de coordenadas abc a $qd0$ para un inversor de dos niveles de tensión.	28
2.12. Posibilidades de selección de V_s usando un inversor trifásico de 2 niveles.	30
2.13. Movimiento del flujo ψ_s resultante de la aplicación de los vectores de tensión.	30
3.1. Diagrama de control aplicando metodología FSC-MPC a un motor de inducción ali- mentado por inversores multinivel.	33

3.2. Diagrama de flujo para la implementación de la metodología FCS-MPC en la máquina de inducción.	34
3.3. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 1.	36
3.4. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 1.	37
3.5. Velocidad angular aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 1.	38
3.6. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 1.	39
3.7. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 1.	40
3.8. Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	41
3.9. Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	42
3.10. Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	43
3.11. Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	44
3.12. Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	44
3.13. Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	45
3.14. Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	45
3.15. Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	46

3.16. Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	46
3.17. Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	47
3.18. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.	49
3.19. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	50
3.20. Velocidad angular aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con - Prue- ba 2.	51
3.21. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 2.	52
3.22. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 2.	53
3.23. Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 2.	54
3.24. Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 2.	55
3.25. Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s =$ $100\mu s$ - Prueba 2.	57
3.26. Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s =$ $100\mu s$ - Prueba 2.	57
3.27. Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s =$ $100\mu s$ - Prueba 2.	58
3.28. Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s =$ $100\mu s$ - Prueba 2.	58
3.29. Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	59

3.30. Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	59
3.31. Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	60
3.32. Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	60
3.33. Diagrama de control aplicando una metodología FCS-MPC junto con un lazo control de velocidad de tipo PI a un motor de inducción alimentado por inversores multinivel.	62
3.34. Seguimiento de velocidad angular aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 3.	63
3.35. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 3.	64
3.36. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 3.	64
3.37. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de 100μ - Prueba 3.	66
3.38. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	66
3.39. Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.	68
3.40. Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	68
3.41. Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s =$ $100\mu s$ - Prueba 3.	70
3.42. Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s =$ $100\mu s$ - Prueba 3.	70
3.43. Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s =$ $100\mu s$ - Prueba 3.	71

3.44. Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.	71
3.45. Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	72
3.46. Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	72
3.47. Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	73
3.48. Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	73
4.1. Representación vectorial de un estado redundante para un inversor de 3 niveles. . .	78
4.2. Desplazamiento del vector ψ_s por la aplicación de un vector de tensión V_{si} en el estator.	79
4.3. Histograma de vectores de tensión aplicados por un inversor de 5 niveles.	80
4.4. Rango para selección de subconjunto de vectores de tensión.	81
4.5. Diagrama de flujo aplicando metodología FSC-MPC con reducción computacional. . .	83
4.6. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	86
4.7. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	88
4.8. Velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ Prueba 1.	90
4.9. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	91

4.10. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	92
4.11. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	93
4.12. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	93
4.13. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	95
4.14. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	96
4.15. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	96
4.16. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.	97
4.17. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	98
4.18. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	98

4.19. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	99
4.20. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.	99
4.21. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.	102
4.22. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	104
4.23. Velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	106
4.24. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.	107
4.25. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.	107
4.26. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.	109
4.27. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	109

4.28. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.	111
4.29. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.	111
4.30. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.	112
4.31. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.	112
4.32. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	113
4.33. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.	113
4.34. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.	114
4.35. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.	114
4.36. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.	117

4.37. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.	118
4.38. Velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	119
4.39. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.	120
4.40. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.	121
4.41. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 3.	122
4.42. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 3.	123
4.43. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.	125
4.44. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.	125
4.45. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.	126

4.46. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.	126
4.47. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	127
4.48. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.	127
4.49. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.	128
4.50. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.	128
4.51. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.	132
4.52. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.	133
4.53. Velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ - Prueba 4.	135
4.54. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 4.	136

4.55. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 4.	136
4.56. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 4.	138
4.57. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 4.	138
4.58. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 4.	140
4.59. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 4.	141
4.60. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.	141
4.61. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.	142
4.62. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 4.	143
4.63. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 4.	143

4.64. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.	144
4.65. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.	144
4.66. Seguimiento de velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 5.	147
4.67. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 5.	148
4.68. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 5.	149
4.69. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 5.	150
4.70. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 5.	151
4.71. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 5.	152
4.72. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 5.	153

4.73. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 5.	155
4.74. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 5.	155
4.75. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 5.	156
4.76. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 5.	156
4.77. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 5.	157
4.78. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 5.	157
4.79. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 5.	158
4.80. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 5.	158
4.81. Seguimiento de velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 6.	161

4.82. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 6.	162
4.83. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 6.	163
4.84. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 6.	164
4.85. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 6.	165
4.86. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 6.	166
4.87. Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 6.	167
4.88. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 6.	169
4.89. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 6.	169
4.90. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 6.	170

4.91. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 6.	170
4.92. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 6.	171
4.93. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 6.	171
4.94. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 6.	172
4.95. Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 6.	172
4.96. Seguimiento de velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 7.	175
4.97. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 7.	176
4.98. Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 7.	177
4.99. Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 7.	179

4.100	Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 7.	180
4.101	Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 7.	181
4.102	Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 7.	182
4.103	Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 7.	184
4.104	Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 7.	184
4.105	Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 7.	185
4.106	Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 7.	185
4.107	Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 7.	186
4.108	Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 7.	186

4.109	Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 7.	187
4.110	Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 7.	187
A.1.	Vectores de tensión en plano $dq0$ para convertidor trifásico de 2-niveles	200
A.2.	Vectores de tensión en plano $dq0$ para convertidor trifásico de 3-niveles	202
A.3.	Vectores de tensión en plano $dq0$ para convertidor trifásico de 4-niveles	204
A.4.	Vectores de tensión en plano $dq0$ para convertidor trifásico de 5-niveles	208

Índice de tablas

2.1. Parámetros nominales del motor de inducción para validación del modelo.	21
2.2. Comparación del error entre modelos de tiempo continuo y discreto respecto a la máquina de inducción de Simulink.	25
2.3. Posición del interruptor y valores de tensión que puede entregar un inversor de 2 a 5 niveles.	26
3.1. Error promedio de par y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 1.	38
3.2. Error promedio de flujo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 1.	41
3.3. Total de vectores a evaluar y el incremento en % con respecto al caso base de 2N - Prueba 1.	42
3.4. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 1.	43
3.5. Valor del rizo máximo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 1.	47
3.6. Error promedio de par y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 2.	51
3.7. Error promedio de flujo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 2.	54
3.8. Total de vectores a evaluar y el incremento en % con respecto al caso base de 2N - Prueba 2.	55
3.9. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 2.	56
3.10. Valor del rizo máximo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 2.	61
3.11. Error promedio de par y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 3.	65
3.12. Error promedio de flujo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 3.	67

3.13. Total de vectores a evaluar y el incremento en % con respecto al caso base de 2N - Prueba 3.	69
3.14. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 3.	69
3.15. Distorsión armónica y rizo máximo en las corrientes del estator - Prueba 3.	74
4.1. Total de vectores de tensión y vectores redundantes que puede entregar un inversor multinivel.	77
4.2. Total de vectores aplicados por cada subconjunto	80
4.3. Tabla para definición del ángulo y número de vectores a evaluar en cada subconjunto.	84
4.4. Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 1.	89
4.5. Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 1.	92
4.6. Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 1.	94
4.7. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 1.	94
4.8. Valor del rizo máximo en las corrientes evaluando diferentes subconjuntos - Prueba 1.	100
4.9. Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 2.	105
4.10. Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 2.	108
4.11. Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 2.	110
4.12. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 2.	110
4.13. Valor del rizo máximo en las corrientes evaluando diferentes subconjuntos - Prueba 2.	115
4.14. Tabla de valores del factor de peso.	116

4.15. Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 3.	119
4.16. Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 3.	121
4.17. Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 3.	123
4.18. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 3.	124
4.19. Valor del rizo máximo en las corrientes evaluando diferentes subconjuntos- Prueba 3.	129
4.20. Definición de valores en los ángulos de cada subconjunto- Prueba 4.	130
4.21. Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 4.	134
4.22. Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 4.	137
4.23. Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 4.	139
4.24. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 4.	139
4.25. Valor del rizo máximo en las corrientes evaluando diferentes subconjuntos - Prueba 4.	145
4.26. Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 5.	149
4.27. Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 5.	151
4.28. Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 5.	153
4.29. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 5.	154
4.30. Distorsión armónica y rizo máximo en las corrientes del estator - Prueba 5.	159
4.31. Definición de valores en los ángulos de cada subconjunto- Prueba 6.	160

4.32. Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 6.	163
4.33. Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 6.	165
4.34. Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 6.	167
4.35. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 6.	168
4.36. Distorsión armónica y rizo máximo en las corrientes del estator - Prueba 6.	173
4.37. Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 7.	178
4.38. Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 7.	181
4.39. Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 7.	182
4.40. Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 7.	183
4.41. Distorsión armónica y rizo máximo en las corrientes del estator - Prueba 7.	188
4.42. Resumen de resultados para el seguimiento de velocidad y cambio de giro	193
4.43. Resumen de resultados para el seguimiento de velocidad	194
A.1. Estados de conmutación y vectores de tensión para inversor trifásico 2-niveles. . . .	201
A.2. Estados de conmutación y vectores de tensión para inversor trifásico 3-niveles. . . .	203
A.3. Estados de conmutación y vectores de tensión para inversor trifásico 4-niveles. . . .	207
A.4. Estados de conmutación y vectores de tensión para inversor trifásico 5-niveles. . . .	213

Lista de Símbolos

$\vec{\psi}_s$	Vector de flujo magnético del estator
$\vec{\psi}_r$	Vector de flujo magnético del rotor
T_e	Par electromagnético
T_L	Par de carga
ω_r	Velocidad angular mecánica del rotor
ω_e	Velocidad angular eléctrica
ω_b	Velocidad angular base
ω	Velocidad del marco de referencia
J	Módulo de inercia
P	Número de polos
X_m	Inductancia de magnetización
X_{ls}	Inductancia de fuga del estator
X_{lr}	Inductancia de fuga del rotor
R_s	Resistencia del estator
R_r	Resistencia del rotor
T_s	Tiempo de muestreo
S_i	Función de conmutación
\vec{V}_s	Vector de tensión del estator
i_a	Corriente en la fase a
i_b	Corriente en la fase b
i_c	Corriente en la fase c

Capítulo 1

Planteamiento del problema y antecedentes

1.1. Introducción

La energía eléctrica, convertida en trabajo mecánico usando máquinas eléctricas, tiene múltiples aplicaciones. Así, las máquinas eléctricas son uno de los principales dispositivos que consumen energía eléctrica en los países industrializados. Numerosos estudios han sido enfocados a su diseño, control y optimización. Actualmente, el control automático de las máquinas eléctricas permite lograr altos desempeños, y muchos de estos logros han sido posibles gracias a la incorporación de convertidores estáticos en el control de las máquinas eléctricas.

Por otra parte, los convertidores estáticos de potencia han evolucionado gracias a los desarrollos tecnológicos y científicos en diversas disciplinas, permitiendo el desarrollo de nuevas topologías. Entre las topologías más recientes y apropiadas para el control de máquinas eléctricas en niveles de media y alta tensión, se encuentran los convertidores de tipo multinivel. Estos sintetizan formas de onda de más de dos niveles de tensión y permiten manejar niveles de tensión más elevados que los que podrían manejar los semiconductores de potencia de manera individual. Con ello, el control de las máquinas eléctricas se ve beneficiado con la disponibilidad de un mayor número de niveles discretos de tensión y a su vez los devanados son sometidos a un menor estrés dieléctrico gracias a la disminución del gradiente de tensión que se les aplica.

En esta tesis se investiga la aplicación de la metodología de control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas (FCS-MPC) a un motor de inducción alimentado por un inversor multinivel.

Primeramente, en este capítulo se presenta la motivación de este trabajo de investigación. Posteriormente, se hace una breve reseña de investigaciones acerca de la metodología MPC y sus aplicaciones. Después, se plantean los objetivos principales de este trabajo, sus hipótesis y conclusiones preliminares acerca del posible alcance de esta investigación.

1.2. Motivación

El motor de inducción es muy utilizado en los sectores industriales, debido a su diseño simple y su robustez, prácticamente puede trabajar sin mantenimiento; muchas investigaciones se han enfocado en el estudio de este elemento y sus sistemas de control.

Uno de los métodos utilizados para controlar el par y la velocidad de un motor de inducción es el control directo de par (DTC)¹ [1–3]. Esta metodología toma en cuenta la dinámica del flujo y par del motor, controlando directamente el flujo del estator de manera que el par deseado se logra eligiendo una combinación de los niveles discretos de tensión proporcionados por el inversor y aplicándola a los devanados del motor; para ello se utiliza una tabla de conmutación previamente diseñada, que dependiendo de las particularidades de la aplicación puede incluir diferentes objetivos de control. Sin embargo, la complejidad del sistema de control DTC se incrementa cuando el motor es alimentado por un convertidor multinivel. Al existir un mayor número de vectores de tensión, el proceso de selección se vuelve muy complicado y el uso de tablas se vuelve ineficiente.

En este sentido, el control predictivo basado en modelo (MPC) [4,5] ofrece una metodología de control que se adapta bien a la naturaleza híbrida del sistema formado por el convertidor estático

¹Por sus siglas en ingles

multinivel y la máquina de inducción. Este enfoque se basa en evaluar la respuesta de las variables de interés ante todas las entradas posibles y entonces seleccionar la entrada que mejor convenga a los objetivos de control. Sin embargo, esta metodología presenta el problema que, al aumentar el número de niveles de tensión del convertidor, este proceso se puede complicar debido a la alta carga computacional que requiere.

En este trabajo se busca emplear un esquema de control FCS-MPC para un motor de inducción alimentado por inversores multinivel y proponer un método eficiente para la selección de vectores, con el fin de obtener una reducción del costo computacional.

1.3. Antecedentes

Como se muestra en [6, 7], la comunidad de investigación ha comenzado a considerar los esquemas de control MPC como una forma de introducir mejoras en el rendimiento de los accionamientos eléctricos. La razón principal de esto es que, aunque el MPC puede presentar una carga computacional importante, esta metodología puede manejar fácilmente sistemas multivariados y no linealidades de una manera muy intuitiva.

El MPC es sobre todo una metodología de control. En [8, 9] se revisa el principio operativo del MPC e identifica tres elementos clave, el modelo de predicción, el horizonte de predicción y la función de costo, cada elemento ha sido motivo de investigación y mejora. El rendimiento del control predictivo está influenciado por la calidad del modelo de predicción, es por esto que en [10] se exponen las técnicas más comunes de discretización para ecuaciones que modelan sistemas continuos. Entre los más usados se tiene la aproximación de Euler y la expansión en series de Taylor. En [11] se estudian los horizontes de predicción mayores a 1, donde se demuestra que horizontes de predicción mayores producen un mejor rendimiento en estado estacionario, pero el costo computacional aumenta.

La función de costo es otro de los elementos que integran el control MPC. Este elemento tie-

ne la posibilidad de integrar varias variables del sistema en una sola ley de control, incluyéndolas con factores de ponderación adecuados. Sin embargo, actualmente estos factores se determinan empíricamente. En [12] se presenta un conjunto de pautas para reducir la incertidumbre de este proceso. Primero se define una clasificación de las diferentes funciones de costo y factores de ponderación. Después, se normalizan las variables e identifican parámetros primarios y secundarios. Posteriormente, se inicializa el factor de ponderación del parámetro secundario con diferentes órdenes de magnitud para cubrir un rango muy amplio, i.e(0, 0.1, 1 y 10), luego se comparan el resultado de las variables, posteriormente se repite esta acción en el intervalo donde se obtuvieron los mejores resultados y se vuelve a repetir el proceso, hasta que los resultados sean los deseados.

Por otra parte, al implementar un control MPC en un sistema alimentado por convertidores multinivel, el proceso de selección del nivel de tensión óptimo se complica aumentando el costo computacional. Por esta razón, en diversos estudios se han desarrollado estrategias para reducir la carga computacional. En [13], se presenta una técnica donde se evalúa solo un subconjunto de vectores para reducir el número de cálculos, este subconjunto son los vectores adyacentes a la posición del vector de tensión aplicado un paso anterior, el objetivo es el seguimiento de trayectoria de corriente de una red eléctrica trifásica alimentada por un inversor mayor a 5 niveles. Otra referencia es [14] donde se propone un algoritmo simplificado para un motor de inducción basado en una nueva tabla de conmutación de control directo de par (DTC) para reducir el número de vectores de voltaje a evaluar. Esta tabla se basa en la estrategia DTC, donde tomando en cuenta el sector y el signo de desviación del vector de flujo del estator y el signo de desviación del par se determinan los posibles vectores a evaluar para cada caso. La nueva tabla de conmutación también ayuda a reducir la frecuencia de conmutación promedio y su rango de variación. Como resultado, la función de costo se simplifica al no requerir incluir el término para la reducción de la frecuencia. Los resultados experimentales muestran que el tiempo promedio de ejecución y la frecuencia promedio de conmutación se reducen en 26 % sin afectar el par y el flujo con respecto al FCS-MPC convencional.

En [15, 16] se propone un esquema de control predictivo que tiene como objetivos mantener

el par, el flujo del estator y el potencial del punto neutro del inversor de tres niveles ACS 6000 ², tomando en cuenta un horizonte de predicción de dos. Por otro lado, en [17] se muestra cómo el MPC se puede adaptar a una topología de cinco niveles para alimentar el mismo sistema. Existen otras investigaciones como [18,19] aplicando este control a máquinas síncronas de imanes permanentes, alimentadas por inversores multinivel donde se tiene el mismo objetivo, que es controlar el par.

Otros objetivos del MPC aplicado a máquinas eléctricas no solo apuntan al control de par y flujo, sino también a otros objetivos simultáneos, como se muestra en [20], donde el algoritmo MPC reduce la frecuencia de conmutación de un inversor de dos niveles con respecto a un control lineal PI con modulación por ancho de pulso (PWM). Otra referencia es [21], en donde se presenta un controlador predictivo de la corriente del estator que evita la excitación de la resonancia del filtro, realiza una amortiguación activa y permite un control rápido de la corriente mientras mantiene una baja frecuencia de conmutación. Además, se ha reportado sobre aplicaciones multifase [22,23] y operación sin sensores [24,25].

Igualmente, el control MPC aplicado a máquinas eléctricas ha demostrado poseer ciertas ventajas con respecto a otros controladores, como se muestra en [26] donde se compara el control MPC con respecto a un control de campo orientado (FOC) para una máquina de inducción alimentada por un inversor de dos niveles; los resultados presentados muestran que el control FOC tiene una respuesta transitoria mucho más lenta que el control MPC, otra diferencia es que el control FOC no es robusto ante incertidumbres paramétricas con respecto al control MPC.

Así mismo en [27], se realiza el comparativo entre el control DTC y MPC, empleando un inversor de tres niveles. Los resultados indican que poseen una gran similitud en respuesta dinámica. Una ventaja del control DTC es que no necesita el modelo interno de la máquina para poder realizar el control, sin embargo, al aumentar los niveles de tensión del inversor, el control DTC se vuelve más complicado de implementar en comparación al control MPC.

²Product Webpage of ACS 6000 Available: www.abb.com/motors and drives

También, el control MPC se ha implementado con diferentes topologías de inversores. En [28], se aplica esta metodología para un inversor de punto neutro anclado (NPC) de tres niveles, y en [29] se emplea esta técnica de control para un inversor con una topología de capacitores flotantes (FCI), donde se busca controlar la corriente de carga además del equilibrio de la tensión de los condensadores.

Otra aplicación es en los rectificadores activos de entrada y salida (AFE); donde el objetivo del MPC es controlar la entrada de potencia activa y reactiva, así como la tensión del enlace de corriente continua (CC).

Por otra parte, en [30, 31] se presenta una descripción detallada del control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas (FCS-MPC) aplicado a los convertidores de potencia. Los aspectos claves son presentados en profundidad y comparados con las técnicas tradicionales de control, como los métodos lineales que usan modulación de ancho de pulso. El estudio se realiza para resaltar el potencial y desafíos del FCS-MPC. Entre las conclusiones se encuentra la factibilidad y el gran potencial que tiene el control FCS-MPC, debido a las capacidades actuales de procesamiento, particularmente para los sistemas de potencia con un número reducido de estados de conmutación y principios operativos complejos, como lo son convertidores matriciales y convertidores multinivel. Además, al permitir la inclusión de varios objetivos de control en una misma función de costo, el rendimiento en los sistemas de conversión de potencia se puede mejorar.

Otra referencia que podemos agregar es [32], en este trabajo se proporcionan las condiciones suficientes para la estabilidad práctica local de una clase específica de sistemas eléctricos de potencia controlados a través del control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas (FCS-MPC). Se toman los criterios de estabilidad de Lyapunov para estudiar el comportamiento del sistema, donde los ejemplos ilustrativos son un convertidor de tres niveles buck DC-DC y un inversor de dos niveles DC-AC.

Como se puede observar, existe una gran variedad de aplicaciones para el MPC, además esta metodología tiene una excelente adaptación a sistemas híbridos. En esta investigación se propone un control MPC para un motor de inducción alimentado por inversores multinivel.

1.4. Objetivos

General:

- Desarrollar un esquema de control predictivo para una máquina de inducción alimentada por un inversor multinivel con una carga computacional reducida.

Específicos:

- Controlar el par y el flujo del motor dentro de los límites preestablecidos.
- Desarrollar e implementar un método eficiente para la selección de vectores.
- Incluir restricciones operativas en los objetivos de control.

1.5. Hipótesis

El control predictivo basado en modelo para un motor de inducción usando inversores multinivel es una estrategia de control que se basa en el modelo del sistema para estimar el comportamiento futuro del mismo ante cada una de las entradas de control posibles.

La operación óptima del sistema se encuentra solucionando un problema de optimización sujeto a restricciones para cada periodo de muestreo, considerando cada uno de los posibles estados del convertidor; los estados de conmutación del convertidor representan las entradas de control del sistema.

El uso de una metodología basada en FCS-MPC en conjunto con un convertidor multinivel permitirá seleccionar el estado de conmutación que mejor convenga a los objetivos de control, entre los que se encuentran los siguientes:

- Regular el par electromagnético producido por la máquina.
- Regular el flujo de la máquina.

Asimismo, permitirá la incorporación de restricciones adicionales. Entre las restricciones adicionales se tiene:

- Saltos entre niveles de tensión adyacentes.

Debido a la gran cantidad de vectores de tensión disponibles en un inversor multinivel, se requiere una gran cantidad de cálculos, lo que dificulta la implementación de este algoritmo en una plataforma de control estándar.

Se desarrollará una estrategia que consista en evaluar un subconjunto del total de vectores disponibles, lo cual permitirá reducir considerablemente la cantidad de cálculos sin afectar el rendimiento del sistema.

1.6. Estructura de la tesis

Este documento está estructurado de la siguiente manera.

Capítulo I: Se exponen algunos trabajos acerca de control predictivo basado en modelo, también se explican los temas de motivación, hipótesis y conclusiones preliminares acerca de este tema de investigación.

Capítulo II: Primero se presenta el control FSC-MPC donde se expone el funcionamiento y la adaptación a los sistemas en general. Después se abordan conceptos generales sobre la máquina

de inducción, también se presenta el modelado de la máquina de inducción en tiempo continuo y discreto, estos dos modelos matemáticos serán sometidos a pruebas de validación. Posteriormente se presentan los inversores multinivel, se muestra el funcionamiento y el modelo vectorial que servirá de soporte en la metodología de control y reducción de cálculos en los capítulos posteriores. Finalmente se presenta el problema de control.

Capítulo III: En este capítulo se realiza la implementación de un controlador FSC-MPC en un motor de inducción alimentado por inversores multinivel. En las diferentes pruebas se buscará mantener el par, el flujo y la velocidad angular del motor sus valores de referencia, en estas pruebas el sistema será alimentado por inversores de 2, 3, 4 y hasta 5 niveles.

Capítulo IV: Debido a la gran cantidad de cálculos en el control FSC-MPC alimentado por convertidores multinivel, en este capítulo se implementa un algoritmo que logra reducir la cantidad de cálculos sin descuidar los objetivos de control. Posteriormente se realizan pruebas para obtener datos sobre la eficiencia de esta nueva propuesta. En las pruebas también se incluirán factores de peso para dar prioridad a ciertas variables como lo son el flujo y los saltos de nivel. Al final se realizará una prueba incluyendo incertidumbres en los parámetros del sistema.

Capítulo V: En este capítulo final se presentan las conclusiones globales y aportes acerca de este trabajo de investigación y se dan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

1.7. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los antecedentes de los trabajos acerca de la metodología MPC, realizando una síntesis de algunas de las aplicaciones encontradas en la literatura. Se puede concluir que la aplicación de MPC en sistemas alimentados por inversores multinivel trae ciertos beneficios como fácil implementación y flexibilidad para poder integrar diferentes objetivos de control.

Sin embargo, en la mayoría de las investigaciones coinciden en que esta metodología de control es muy demandante computacionalmente, tomando en cuenta que los convertidores multinivel poseen un gran número de estados, lo cual demanda una gran cantidad de operaciones.

Así, la principal motivación de este trabajo es desarrollar una metodología FSC-MPC para un motor de inducción alimentado por inversores multinivel poniendo como objetivo el desarrollo de un algoritmo que reduzca la demanda de cálculos manteniendo el desempeño en el par y el flujo de la máquina.

Capítulo 2

Control FSC-MPC de la máquina de inducción

2.1. Introducción

La evolución del control en los sistemas electromecánicos ha sido impulsada principalmente por necesidades de la industria e influenciada por el desarrollo logrado en varias tecnologías, como semiconductores de potencia, topologías de convertidores, electrónica analógica y digital. Actualmente, la tecnología de sistemas de control se encuentra en un punto de cambios, donde los objetivos son más exigentes, buscando la flexibilidad, estabilidad y robustez del sistema.

En este capítulo, primeramente, se presenta el esquema de control MPC para un sistema en general. Posteriormente se aborda la metodología de control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas FSC-MPC, donde se explican los requerimientos para su implementación. Después se presenta una sección acerca del motor de inducción donde se plantean las ecuaciones matemáticas que modelan el comportamiento del sistema; posteriormente se desarrolla el modelo discreto de este sistema. Al final, se valida el modelo discretizado y se compara con el modelo continuo.

Luego, se abordan los inversores de tensión y se presenta su modelo en forma vectorial. Al final se define el problema de control de una máquina de inducción.

2.2. Sistema de Control MPC

En la figura 2.1 se muestra un diagrama a bloques de un sistema de control de una máquina/motor de inducción el cual está constituido de dos etapas.

1. Etapa de control: control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas FSC-MPC.
2. Etapa de potencia: inversor.

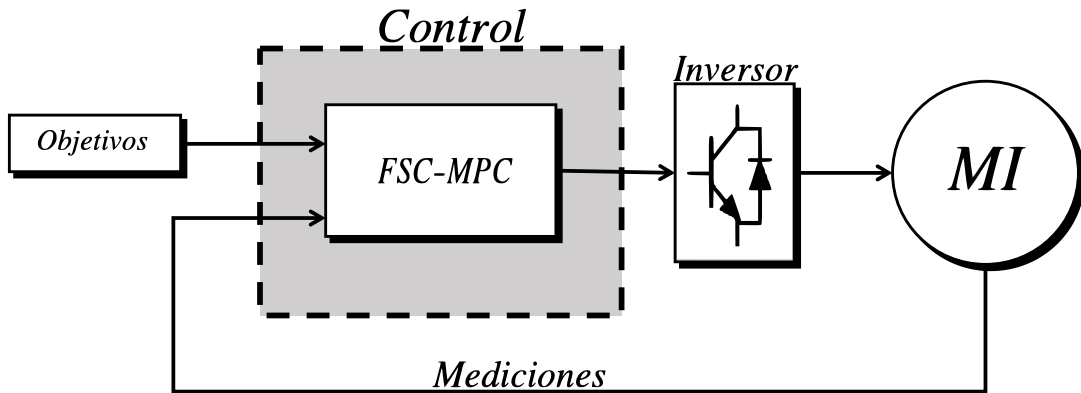


Figura 2.1: Diagrama de control general.

El esquema de control está constituido por los objetivos de control; los objetivos pueden ser el par, flujo y restricciones adicionales. El controlador es alimentado con la referencia de la variable o variables a controlar y con las mediciones del sistema. Las mediciones, en esta clase de sistemas pueden ser las corrientes, tensiones y la velocidad angular del motor. Tanto los objetivos como las mediciones se introducen en el bloque de control, que en este caso está constituido por la metodología FSC-MPC, que demandará al inversor la entrada que más convenga para lograr los objetivos de control.

2.3. Control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas FCS-MPC

El FCS-MPC es una metodología de control en la que se aprovecha el número finito de entradas o estados del sistema para predecir el comportamiento futuro de las variables a controlar ante cada una de las posibles entradas, con base en un modelo del sistema en tiempo discreto.

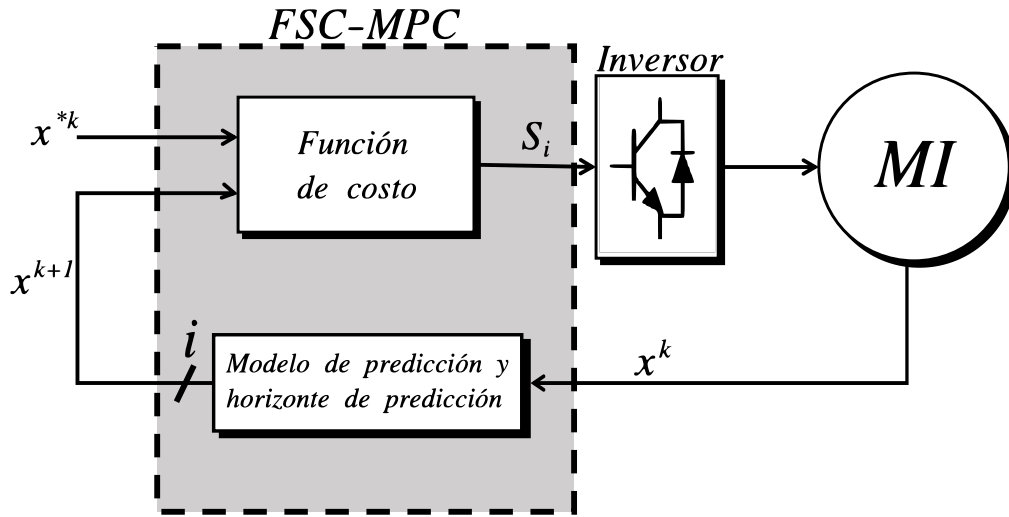


Figura 2.2: Diagrama de control general aplicando FCS-MPC.

Como se puede observar en la figura 2.2, la implementación del control FCS-MPC consta de tres partes principales, las cuales son:

1. Modelo de predicción del sistema
2. Horizonte de predicción
3. Función de costo

Estas partes están presentes en todos los esquemas de control predictivo. Una ventaja es que es posible modificar cada etapa independientemente para ajustar el esquema del controlador a cualquier configuración. Por ejemplo, si la carga cambia, solo se debe modificar el modelo discreto; si el convertidor cambia, solo se deben ajustar los estados de conmutación en los que se evalúa el modelo; y si el objetivo de control cambia, solo la función de costo debe adaptarse.

2.3.1. Modelo de predicción

La metodología de control predictivo se basa en un modelo en tiempo discreto para predecir el comportamiento del sistema, ante las posibles entradas de control.

Existen varias técnicas para la discretización del sistema, por lo general es necesario hacer concesiones entre la precisión y la complejidad del modelo. El rendimiento del control predictivo es dependiente de la calidad del modelo de predicción, la cual depende de la aplicación específica, siendo las más comunes la aproximación de Euler y la expansión en series de Taylor [10].

2.3.2. Horizonte de predicción

El horizonte de predicción define hasta qué punto se predice el comportamiento del sistema a partir del estado donde se encuentra, considerando cada una de las posibles entradas.

La selección del horizonte de predicción depende de la complejidad y de la dinámica del sistema. En algunas investigaciones se han propuesto horizontes mayores a 1, como es el caso de [15,33], donde se toma un horizonte de 2. En particular, las aplicaciones de electrónica de potencia requieren una respuesta del control del orden de decenas de cientos de micro-segundos, ya que su dinámica es muy rápida, es por eso que el FCS-MPC generalmente se limita a horizontes de predicción de 1 o 2 pasos.

2.3.3. Función de Costo

La definición de una función de costo es una de las etapas más importantes en el diseño de un MPC, ya que permite no solo incluir los objetivos de control, si no también incluir cualquier otra restricción requerida. Para determinar cuál de las posibles entradas de control será seleccionada, se debe evaluar cada predicción en una función de costo. Esta se define como:

$$J_i = f_g \left\{ x^{*k+1}, x_i^{k+1} \right\} \quad ; \quad i = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

La ecuación (2.1) muestra la forma general de la estructura de una función de costo f_g donde x^{*k+1} es el valor de referencia de un estado y x_i^{k+1} es la predicción de la variable para cada una de las i entradas posibles; ambas variables expresan el valor de la variable en el instante de tiempo $k + 1$.

El valor de referencia en $k + 1$, x^{*k+1} , se puede considerar igual al valor actual en k , x^{*k} , puesto que T_s es lo suficientemente pequeño comparado con el comportamiento dinámico del sistema, y por tanto la referencia puede ser considerada como constante durante el periodo T_s . Si el sistema es altamente dinámico, el valor de referencia futuro x^{*k+1} puede ser estimado mediante un método de extrapolación adecuado.

La evaluación de la función de costo con las i predicciones, conducirá a i diferentes costos, siendo seleccionada la acción de control que lleve al costo mínimo, $\min \{J_i\}$.

Los errores se pueden medir con funciones de costo [34] tales como:

$$J = \left| x^{*k} - x^{k+1} \right| \quad (2.2)$$

$$J = \left| x^{*k} - x^{k+1} \right|^2 \quad (2.3)$$

$$J = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \left| x^{*k} - x^{k+1} \right| dt \quad (2.4)$$

La diferencia entre (2.2) y (2.3) es que esta última produce una mayor penalización de los errores más grandes en comparación con los más pequeños. Esto se puede usar para controlar variables más cercanas a la referencia y reducir la amplitud de las oscilaciones. En esencia, esta medida de error producirá un controlador más rápido para la variable específica en la función de costo; sin embargo, también introducirá frecuencias de conmutación más altas. La función de costo (2.4) tiene en cuenta la predicción completa durante T_s , no solo el valor final en $k + 1$; por lo tanto, el

valor medio de la variable está más cerca de la referencia, lo que da como resultado un seguimiento de referencia más preciso. Considerando períodos de muestreo pequeños, como es común en los convertidores de potencia, las tres funciones de costo no presentan diferencias notables en sus rendimientos. Por lo tanto, para simplificar y reducir el esfuerzo computacional, (2.2) se ajustará a la mayoría de las aplicaciones.

2.4. Modelado de la máquina de inducción

En esta sección se desarrollará el modelo en tiempo continuo y discreto de la MI; el sistema se modela en un marco de referencia arbitrario en coordenadas " $dq0$ " [35]. La MI se separa en dos partes: *a)* Parte eléctrica, *b)* Parte mecánica, los sub-índices " s " y " r " se refieren al estator y al rotor, respectivamente.

2.4.1. Modelo continuo de la máquina de inducción

Análisis eléctrico de la máquina de inducción en tiempo continuo

Las ecuaciones diferenciales (2.5)-(2.21) describen el comportamiento eléctrico de la máquina de inducción, mediante ellas se realiza el cálculo de flujos del estator. En esta investigación se expresa el voltaje y el enlace de flujo en términos de reactancias, debido a que los parámetros de la máquina y de los sistemas eléctricos de potencia generalmente se dan en ohmios o 'per unit system' de una base de impedancia, por lo tanto es conveniente expresar la ecuación de la tensión y los enlaces de flujo en términos de reactancias en lugar de inductancias [35].

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - r_s i_{qs} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} \right] \quad (2.5)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} - r_s i_{ds} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} \right] \quad (2.6)$$

$$\frac{d\psi_{0s}}{dt} = \omega_b [v_{0s} - r_s i_{0s}] \quad (2.7)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v_{qr} - r_r i_{qr} - \left[\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right] \psi_{dr} \right] \quad (2.8)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v_{dr} - r_r i_{dr} + \left[\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right] \psi_{qr} \right] \quad (2.9)$$

$$\frac{d\psi_{0r}}{dt} = \omega_b [v_{0r} - r_r i_{dr}] \quad (2.10)$$

donde ω_b es la velocidad angular eléctrica base, utilizada para calcular las reactancias. Las variables ψ_{qs} , ψ_{ds} y ψ_{0s} son los flujos del estator respecto al marco de referencia $qd0$. Las variables ψ_{qr} , ψ_{dr} y ψ_{0r} son los flujos del rotor respecto al marco de referencia $qd0$.

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) \quad (2.11)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) \quad (2.12)$$

$$i_{0s} = \frac{1}{X_{ls}} \psi_{0s} \quad (2.13)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{X_{lr}} (\psi_{qr} - \psi_{mq}) \quad (2.14)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{X_{lr}} (\psi_{dr} - \psi_{md}) \quad (2.15)$$

$$i_{0r} = \frac{1}{X_{lr}} \psi_{0r} \quad (2.16)$$

Las variables i_{qs} , i_{ds} , i_{0s} son las corrientes del estator respecto al marco de referencia $qd0$ y las variables i_{qr} , i_{dr} , i_{0r} son las corrientes del rotor respecto al marco de referencia $qd0$. Por otro lado, ψ_{mq} , ψ_{md} , X_{aq} y X_{ad} están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$\psi_{mq} = X_{aq} \left(\frac{\psi_{qs}}{X_{ls}} + \frac{\psi_{qr}}{X_{lr}} \right) \quad (2.17)$$

$$\psi_{md} = X_{ad} \left(\frac{\psi_{ds}}{X_{ls}} + \frac{\psi_{dr}}{X_{lr}} \right) \quad (2.18)$$

$$X_{aq} = X_{ad} = \left(\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X_{lr}} \right)^{-1} \quad (2.19)$$

$$X_s = X_{ls} + X_m \quad (2.20)$$

$$X_r = X_{lr} + X_m \quad (2.21)$$

por simplicidad se define el vector de flujo como:

$$\vec{\psi} = \psi_{qdo} \quad (2.22)$$

la magnitud del vector de flujo esta dado por:

$$|\vec{\psi}| = \sqrt{\psi_q^2 + \psi_d^2} \quad (2.23)$$

Análisis mecánico de la máquina de inducción en tiempo continuo

En la parte mecánica, la expresión del par electromagnético en un marco de referencia arbitrario es:

$$T_e = K_L |\vec{\psi}_s| |\vec{\psi}_r| \sin \gamma \quad (2.24)$$

donde $|\vec{\psi}_s| |\vec{\psi}_r|$ son las magnitudes de los vectores de flujo del estator y rotor respectivamente, γ es el ángulo que existe entre el vector de flujo del estator $\vec{\psi}_s$ y del rotor $\vec{\psi}_r$. Por último, K_L es una constante definida por:

$$K_L = \frac{3}{2} \frac{P X_m}{\sigma X_s X_r} \quad (2.25)$$

$$\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_s X_r} \quad (2.26)$$

La velocidad angular está definida por:

$$\omega_r = \int \frac{P}{2J} (T_e - T_L) \quad (2.27)$$

Donde P indica el número de polos, J es el módulo de inercia y T_L es el par de carga.

Existen al menos tres tipos de marcos de referencia para describir el comportamiento de la máquina de inducción, y son: a) marco de referencia estacionario, b) marco de referencia fijo en el rotor, y c) marco de referencia que gira en forma síncrona a la frecuencia eléctrica.

En este trabajo se usará el marco de referencia estacionario, debido a que al realizar la transfor-

mación de abc a $dq0$ se requiere, que las fases de referencia (fase a, b, c) no tengan desplazamiento angular con respecto a la fase de referencia de dicha transformación (fase qd) y de esta forma poder relacionar fácilmente las entradas de voltaje del sistema y los enlaces de flujos. A este marco le corresponde $\omega = 0$, y como $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, lo que implica que no existe desplazamiento angular entre la transformación [35].

2.4.2. Modelo discreto de la máquina de inducción

En esta sección, se desarrolla un modelo en tiempo discreto del sistema. El propósito de este modelo es predecir la trayectoria del flujo del estator y el par electromecánico para un cierto horizonte de predicción; la predicción se hace en lazo abierto

Sistema eléctrico de la máquina de inducción en tiempo discreto

Discretizando la función de flujo con la aproximación de Euler hacia adelante se tiene:

$$\frac{d\psi}{dt} \approx \frac{\psi^{k+1} - \psi^k}{T_s} \quad (2.28)$$

Este método de discretización se usa comúnmente para obtener ecuaciones de estado en tiempo discreto para sistemas dinámicos. La razón principal es la derivación simple del modelo de tiempo discreto a partir de ecuaciones de tiempo continuo, así como la baja demanda computacional.

Al sustituir (2.28) en (2.5)-(2.10) se obtiene:

$$\psi_{qs}^{k+1} = \left[T_s \omega_b \left[v_{qs}^k - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds}^k + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}^k) \right] \right] + \psi_{qs}^k \quad (2.29)$$

$$\psi_{ds}^{k+1} = \left[T_s \omega_b \left[v_{ds}^k + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs}^k + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}^k) \right] \right] + \psi_{ds}^k \quad (2.30)$$

$$\psi_{0s}^{k+1} = \left[T_s \omega_b \left[v_{0s}^k - \frac{r_s}{X_{ls}} \psi_{0s}^k \right] \right] + \psi_{0s}^k \quad (2.31)$$

$$\psi_{qr}^{k+1} = \left[T_s \omega_b \left[v_{qr}^k - \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi_{dr}^k + \frac{r_r}{X_{lr}} (\psi_{mq} - \psi_{qr}^k) \right] \right] + \psi_{qr}^k \quad (2.32)$$

$$\psi_{dr}^{k+1} = \left[T_s \omega_b \left[v_{dr}^k + \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qr}^k + \frac{r_r}{X_{lr}} (\psi_{md} - \psi_{dr}^k) \right] \right] + \psi_{dr}^k \quad (2.33)$$

$$\psi_{0s}^{k+1} = \left[T_s \omega_b \left[v_{0r}^k - \frac{r_r}{X_{lr}} \psi_{0r}^k \right] \right] + \psi_{0r}^k \quad (2.34)$$

por simplicidad el vector de flujo se define como:

$$\overrightarrow{\psi}^k = \psi_{qdo}^k \quad (2.35)$$

y la magnitud del vector de flujo está dada por

$$\left| \overrightarrow{\psi}^{k+1} \right| = \sqrt{(\psi_q^{k+1})^2 + (\psi_d^{k+1})^2} \quad (2.36)$$

Sistema mecánico de la máquina de inducción en tiempo discreto

Considerando las ecuaciones de flujo en tiempo discreto (2.29)-(2.34), y tomando como referencia la ecuación de par dada por (2.24), respectivamente, se tiene:

$$T_e^{k+1} = K_L \left| \overrightarrow{\psi}_s^{k+1} \right| \left| \overrightarrow{\psi}_r^{k+1} \right| \text{sen} \gamma \quad (2.37)$$

$$\omega_r^{k+1} = \left[T_s \left[\frac{P}{2J} \left[T_e^{k+1} - T_L^k \right] \right] \right] + \omega_r^k \quad (2.38)$$

Note que para las ecuaciones en tiempo discreto se usa una notación $(\cdot)^k$ para indicar la variable correspondiente en el instante k .

2.4.3. Validación del modelo discreto de la máquina de inducción

En esta sección se valida el modelo discreto de la máquina de inducción realizando una serie de simulaciones para evaluar el método de discretización.

Para la validación se usaron tres modelos; el primero, del paquete de Simulink-Matlab; el segundo, el modelo en tiempo continuo descrito en (2.5)-(2.27) y el tercero el modelo de tiempo discreto descrito en (2.29)-(2.38). La máquina de inducción se encuentra modelada en un marco de referencia estacionario, $\omega = 0$, en coordenadas $dq0$. Los parámetros nominales de la máquina de inducción son dados en la Tabla 2.1. En las pruebas realizadas el modelo continuo que modela la MI tiene un método de solución (Dormand-Prince) con paso variable y una tolerancia de $1e-3$ para un tiempo de simulación de 0.5s. El modelo discreto se validará con periodos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

Motor de inducción 3HP												
V_{ac}	r_s	X_{ls}	X_M	r_r	X_{lr}	J	T_L	f	T_s	Fases	Polos	ω_b
Volts	ohms	ohms	ohms	ohms	ohms	$kg * m^2$	$N * m$	Hertz	μs	#	#	rad/s
220	0.435	0.754	26.13	0.816	0.754	0.089	11.9	60	100/50	3	4	377

Tabla 2.1: Parámetros nominales del motor de inducción para validación del modelo.

Las figuras 2.3-2.8, muestran el comportamiento de par y flujo obtenido por cada uno de los modelos considerados con diferentes periodos de muestreo. La respuesta del modelo de Simulink está dada por el trazo en color azul, el modelo continuo corresponde al trazo en color negro y la máquina modelada en tiempo discreto es el trazo en rojo.

A continuación se realiza una primera prueba con un periodo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. En la figura 2.3 se muestra el par en una máquina de inducción descrito por diferentes modelos matemáticos. Los resultados muestran un comportamiento similar entre el modelo de Simulink y el modelo de tiempo continuo, sin embargo, en el modelo de tiempo discreto tiene un error, que será cuantizado más adelante. En la figura 2.4 se muestra el detalle del par donde se puede observar que el modelo de tiempo discreto posee mayor error con respecto al modelo de tiempo continuo.

En la figura 2.5 se muestra el flujo de la máquina de inducción descrito por diferentes modelos matemáticos aplicando un periodo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los resultados muestran que el modelo discreto poseé mayor error respecto al modelo continuo.

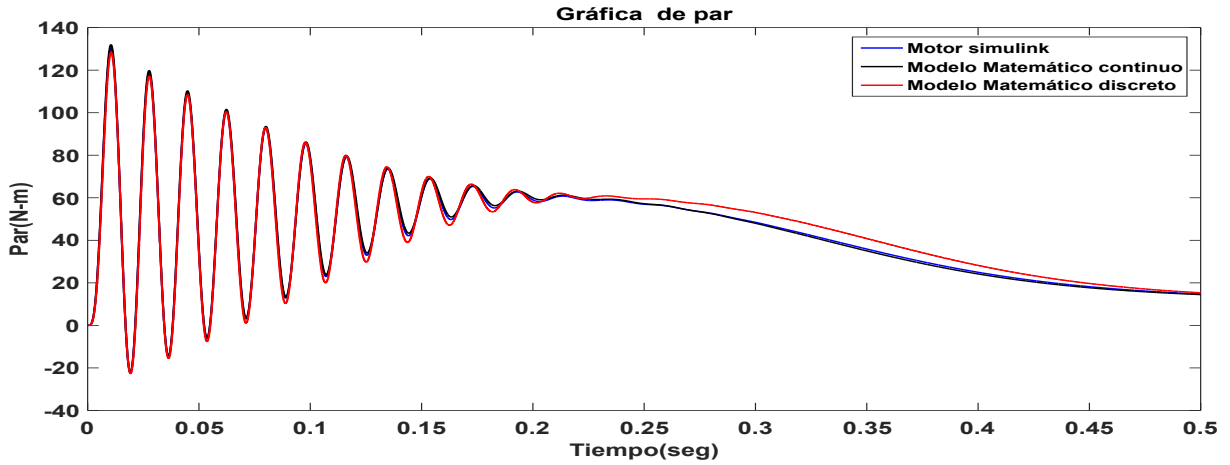


Figura 2.3: Par mecánico de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 100\mu s$.

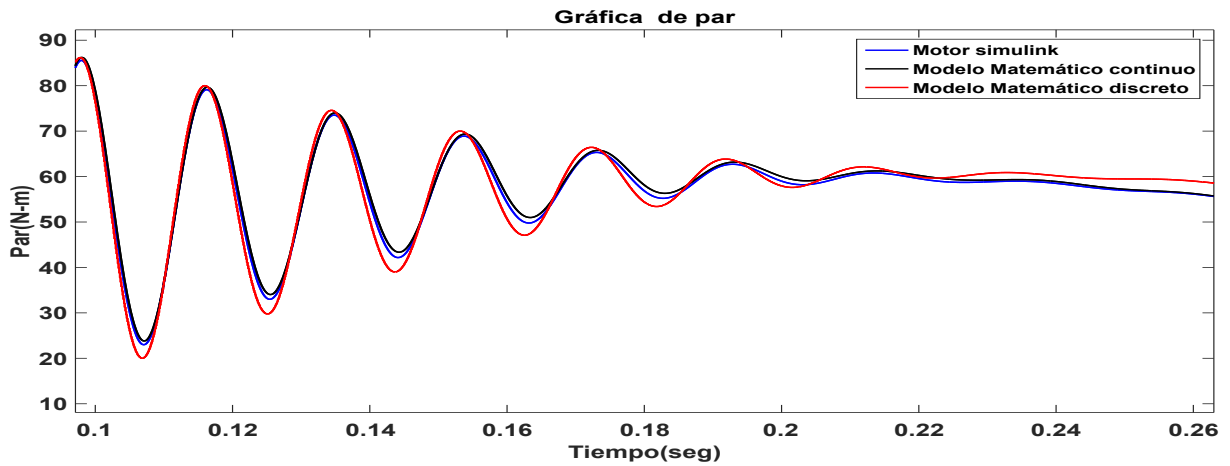


Figura 2.4: Detalle del par mecánico de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 100\mu s$.

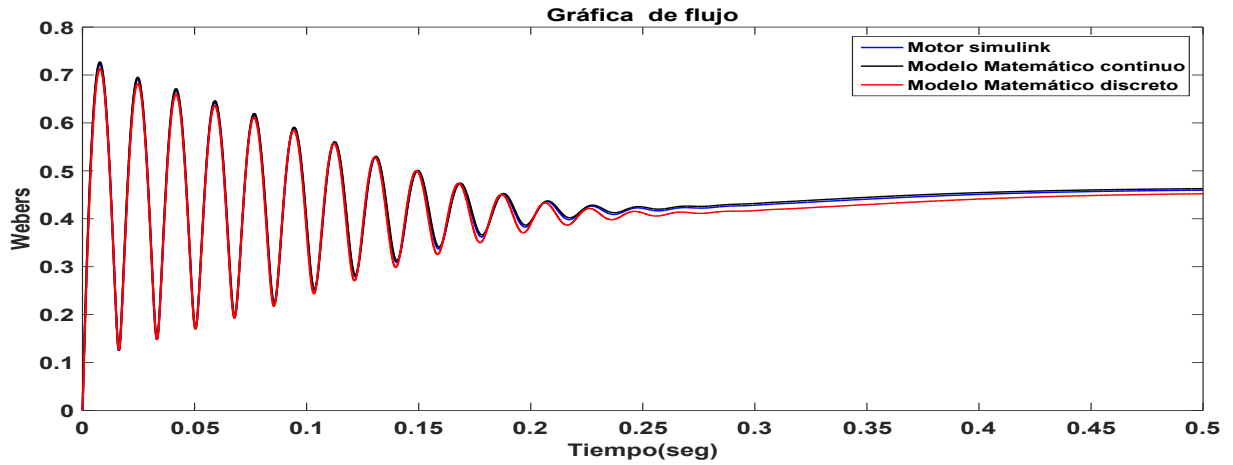


Figura 2.5: Flujo en el estator de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 100\mu s$.

Una segunda prueba se realiza con los mismos parámetros dados en la tabla 2.1 pero ahora con un periodo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En la figura 2.6 se muestra el par en una máquina de inducción descrito por diferentes modelos matemáticos. Se observa que aplicando un $T_s = 50\mu s$ se reduce el error del par en comparación con la prueba anterior usando un $T_s = 100\mu s$. En la figura 2.7 se muestra el detalle del par, se observa que al disminuir el tiempo de muestreo el error en el modelo de tiempo discreto se reduce.

En la figura 2.8 se muestra el flujo de la máquina de inducción descrito por diferentes modelos matemáticos aplicando un periodo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran que al disminuir el tiempo de muestreo el error en el modelo de tiempo discreto se reduce.

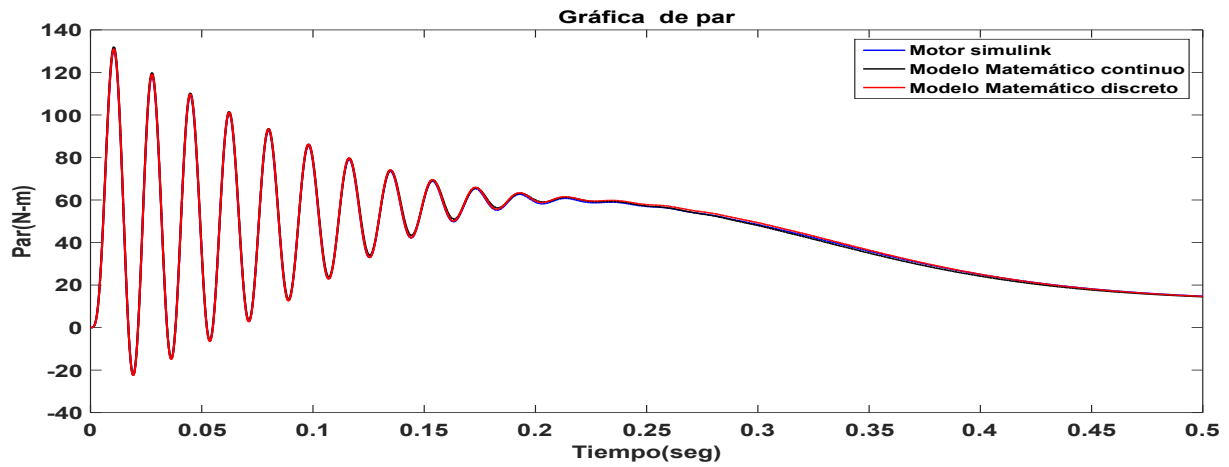


Figura 2.6: Par mecánico de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 50\mu s$.

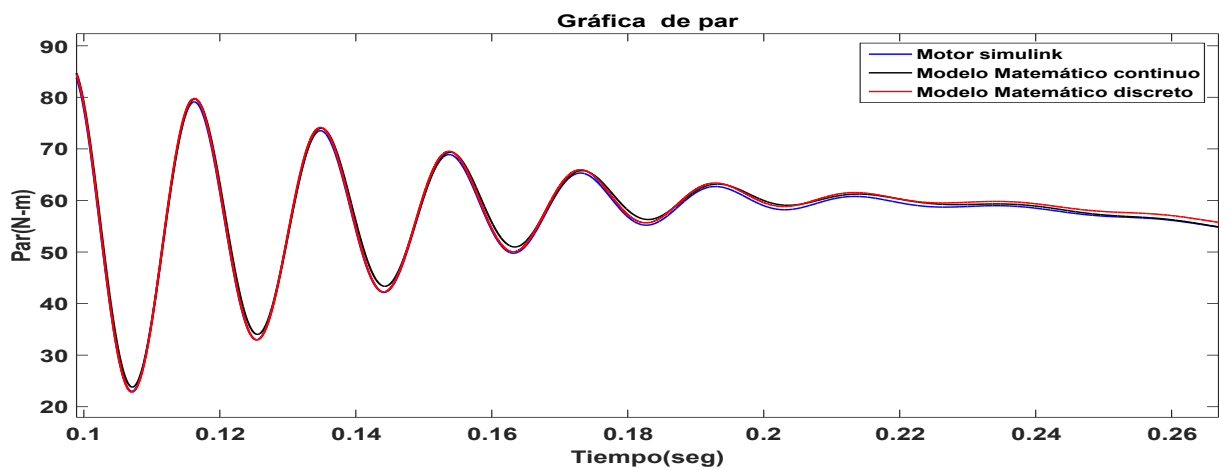


Figura 2.7: Detalle del par mecánico de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 50\mu s$.

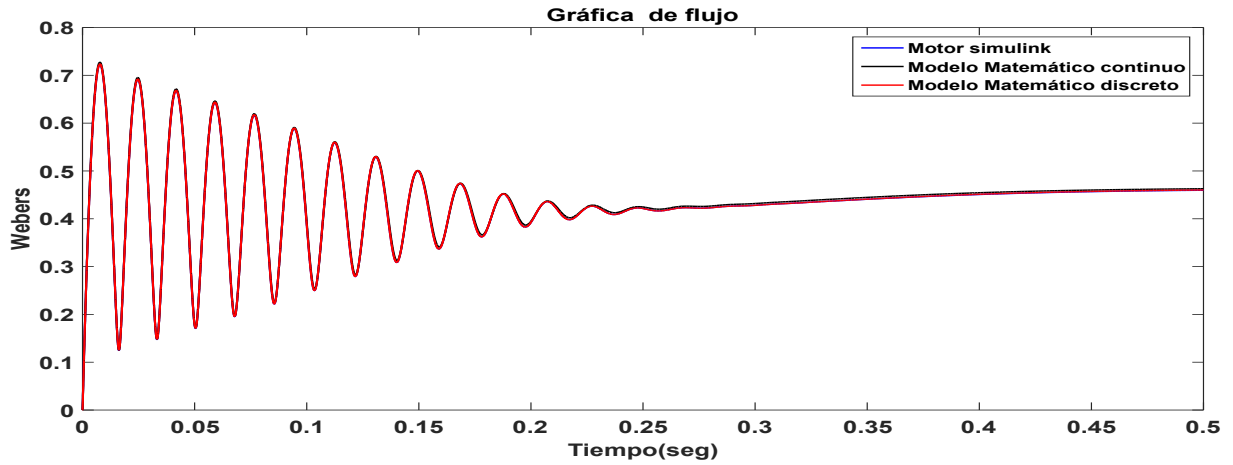


Figura 2.8: Flujo en el estator de la máquina de inducción de 3HP del modelo continuo y discreto con un $T_s = 50\mu s$.

En la tabla 2.2 se muestra el error del par y de flujo además del error máximo. Se observa que disminuyendo el periodo de muestreo a la mitad, se disminuye el error de par y flujo en un 50% entre el modelo discreto de $T_s = 50\mu s$ y $T_s = 100\mu s$ con respecto al modelo de Simulink.

Al final se concluye que un modelo discreto tomando un periodo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ presenta una mejor aproximación al modelo de Simulink. En general, podemos decir que al disminuir el periodo muestro aumenta la precisión del modelo discreto, pero obviamente el esfuerzo computacional requerido será mayor.

Motor de 3 Hp				
Máquina de inducción	Error RMS del par	Error máximo del par	Error RMS del flujo	Error máximo del flujo
Modelo Simulink	Base	Base	Base	Base
Modelo matemático continuo	0.7345 Nm	1.5969 Nm	0.0033 wb	0.0066 wb
Modelo matemático discreto con un $T_s = 50\mu s$	1.1975 Nm	2.215 Nm	0.0034 wb	0.0078 wb
Modelo matemático discreto con un $T_s = 100\mu s$	2.8223 Nm	5.109 Nm	0.0098 wb	0.021 wb

Tabla 2.2: Comparación del error entre modelos de tiempo continuo y discreto respecto a la máquina de inducción de Simulink.

2.5. Convertidores de potencia multi-nivel

Los convertidores estáticos de potencia multi-nivel son estructuras compuestas por un arreglo de interruptores y condensadores que entregan más de dos niveles discretos de tensión a la salida.

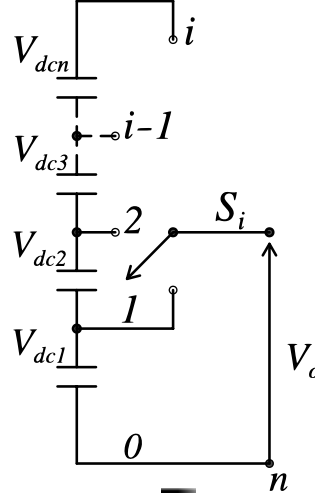


Figura 2.9: Diagrama funcional de un convertidor de n-niveles.

En la Figura 2.9 se muestra la estructura general de un convertidor multinivel. Se considera que está conformado por interruptores ideales S_i , donde $i \in N^+$ indica la posición del interruptor S . En la Tabla 2.3, se muestra el valor de voltaje que entregara el inversor, con base en la posición en la que se encuentre el interruptor S_i ; entre mayores niveles de tensión tenga el inversor más posiciones de selección tiene el interruptor lo cual implica más valores discretos de tensión a la salida.

Niveles de tensión		2 Niveles	3 Niveles	4 Niveles	5 Niveles
Posición del interruptor	S_0	$V_{0n} = 0$	$V_{0n} = 0$	$V_{0n} = 0$	$V_{0n} = 0$
	S_1	$V_{1n} = V_{dc}$	$V_{1n} = \frac{V_{dc}}{2}$	$V_{1n} = \frac{V_{dc}}{3}$	$V_{1n} = \frac{V_{dc}}{4}$
	S_2	-	$V_{2n} = \frac{2V_{dc}}{2}$	$V_{2n} = \frac{2V_{dc}}{3}$	$V_{2n} = \frac{2V_{dc}}{4}$
	S_3	-	-	$V_{3n} = \frac{3V_{dc}}{3}$	$V_{3n} = \frac{3V_{dc}}{4}$
	S_4	-	-	-	$V_{4n} = \frac{4V_{dc}}{4}$

Tabla 2.3: Posición del interruptor y valores de tensión que puede entregar un inversor de 2 a 5 niveles.

En la figura 2.10 se muestra la salida de tensión escalonada para un inversor de n -niveles, donde, dependiendo la posición del interruptor S_i , es el valor de tensión que se tendrá en la línea.

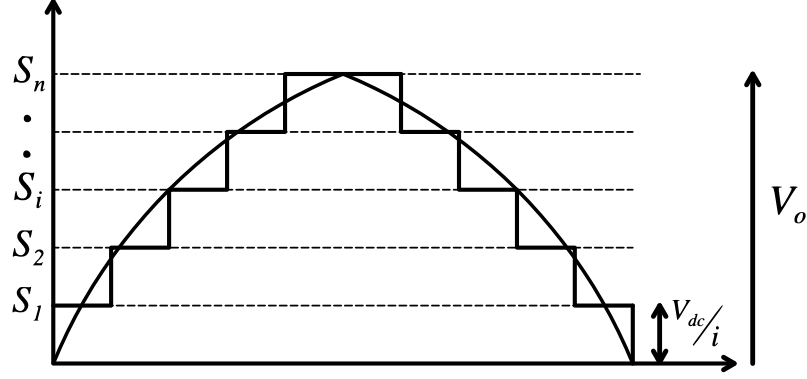


Figura 2.10: Forma de onda escalonada de n -niveles de tensión.

2.5.1. Representación vectorial

Para configuraciones trifásicas, la representación vectorial de la tensión de salida del inversor es una herramienta comúnmente usada para el estudio de convertidores estáticos [28, 31] y de máquinas eléctricas [35]. Se define el vector de tensiones de fase como:

$$v_{abc}^T = \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \end{bmatrix}^T \quad (2.39)$$

donde v_a, v_b y v_c representan las tensiones de las fases a, b y c , respectivamente. En el caso de un inversor trifásico de n niveles, las tensiones de fase sólo pueden tomar valores discretos de tensión. Entonces el número de vectores posibles está dado por las combinaciones de tensión de cada una de las fases, es decir:

$$\begin{pmatrix} \text{Valores discretos} \\ \text{de la fase } a \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Valores discretos} \\ \text{de la fase } b \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{Valores discretos} \\ \text{de la fase } c \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

El cambio del sistema de tres ejes, a uno de dos ejes, se consigue por medio de la siguiente transformación:

$$v_{qd0} = P \quad v_{abc} \quad (2.41)$$

donde P es la matriz de transformación en un marco de referencia estacionario. Así, la transformación está dada por:

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Entonces, en forma vectorial podemos definir:

$$\vec{V}_i = v_{qd0} \quad (2.43)$$

donde i define el i esimo vector generado a partir de la transformación de marco de referencia.

En la figura 2.11 se muestra la transformación de coordenadas abc a $qd0$ para un inversor de dos niveles de tensión, donde las tensiones de cada fase pueden tomar 2 valores diferentes, esto permite ocho posibles combinaciones con magnitudes y ángulos diferentes. Se debe mencionar que dos de estas ocho posibles combinaciones poseen la misma magnitud y fase, estos vectores son \vec{V}_0 y \vec{V}_7 .

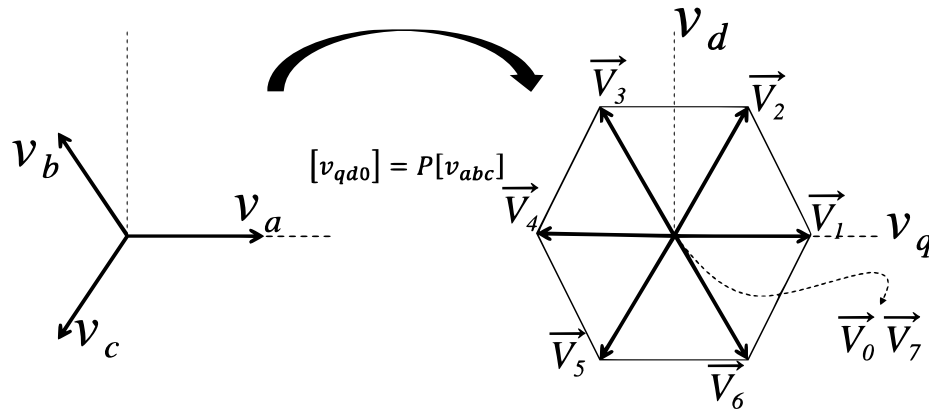


Figura 2.11: Transformación de coordenadas abc a $qd0$ para un inversor de dos niveles de tensión.

Por lo tanto, mientras mayor sean los niveles de tensión que pueda entregar el inversor, mayor

será el número de vectores en la transformación de cuadratura abc a $qd0$. En el Apéndice A se muestran todos los valores de tensión y ángulos que puede entregar un inversor de 2, 3, 4 y 5 niveles.

2.6. Problema de control en la máquina de inducción

El FCS-MPC es una metodología de control en la cual se aprovecha el número finito de entradas (vectores de tensión aportados por el inversor) para predecir el comportamiento futuro de las variables a controlar con base en un modelo en tiempo discreto previamente establecido.

El objetivo de control en el motor de inducción alimentado por un inversor multinivel, es mantener las variables de salida (par y magnitud de flujo) dentro de los límites deseados.

Para determinar cuál de todas las posibles entradas será la seleccionada para alcanzar los objetivos de control, se debe evaluar cada predicción en una función de costo J_i , que usualmente depende de un valor de referencia deseado y de la predicción de la variable.

Para ello se toma en cuenta la función de costo dada por la ecuación (2.2), y la predicción de par y flujo dado por (2.36)-(2.37). Así, se define la siguiente función de costo:

$$J_i = \left| T_e^{k*} - T_e^{k+1} \right| + \left| \overrightarrow{\psi_s^{k*}} - \overrightarrow{\psi_s^{k+1}} \right| \quad (2.44)$$

La función de costo de la ecuación (2.44) busca como objetivo mantener un par de referencia T_e^{k*} y un flujo magnético constante $\overrightarrow{\psi_s^{k*}}$. Adicionalmente, se pueden integrar en esta función de costo otros objetivos de control o restricciones operativas al sistema.

Como se muestra en la figura 2.12 todos los voltajes $\overrightarrow{V_{si}}$ proporcionados por el inversor se toman en cuenta para predecir las evoluciones posibles del par y del flujo, para posteriormente evaluar cada una de las predicciones en la función de costo, dada por la ecuación (2.44).

Posteriormente, en la figura 2.13 se muestra la aplicación del vector de tensión \vec{V}_{si} que minimiza el error, logrando así generar un movimiento controlado y secuenciado que guía el vector de flujo $\vec{\psi}_s$ en una trayectoria de referencia $\vec{\psi}_s^*$ dentro de una banda de error $\Delta\vec{\psi}_s^*$, a una velocidad tal que regula el ángulo γ para mantener la magnitud del par deseado.

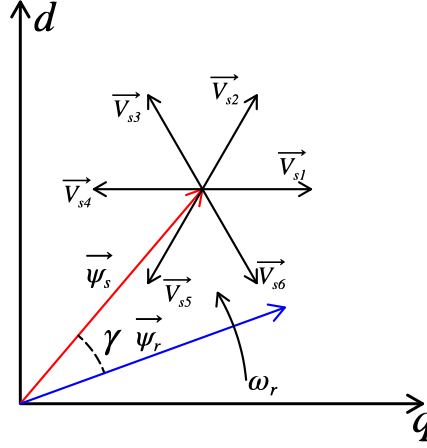


Figura 2.12: Posibilidades de selección de V_s usando un inversor trifásico de 2 niveles.

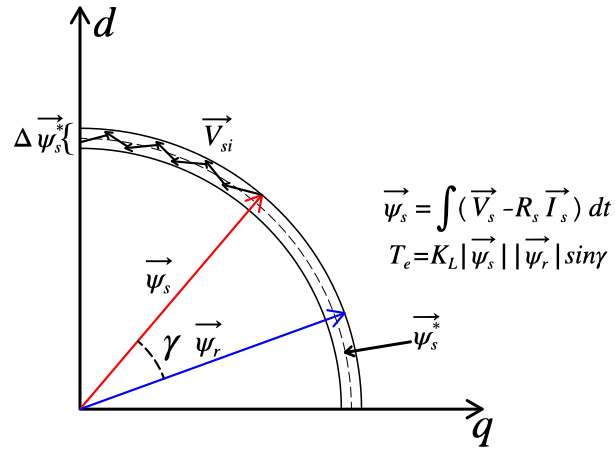


Figura 2.13: Movimiento del flujo ψ_s resultante de la aplicación de los vectores de tensión.

2.7. Conclusiones

En este capítulo se abordaron diferentes temas. Primero se mostró los requerimientos de implementación de un control FCS-MPC los cuales son el modelo de predicción, el horizonte de predicción y la función de costo. Después se presentó el análisis de un motor de inducción donde se desarrollaron las ecuaciones que modelan el sistema en tiempo continuo y discreto. Se determinó que la precisión del modelo discreto depende del tiempo de muestreo seleccionado, sin embargo, disminuir el tiempo de muestreo conlleva a que se tenga menor tiempo disponible para realizar operaciones, lo cual no es recomendable a la hora de implementar metodologías de control usando procesadores digitales. También, se abordaron los convertidores multinivel y su forma de representación vectorial para un sistema trifásico; entre mayor número de niveles de tensión posea el inversor mayor será el número de vectores resultantes en la transformación de marco de referencia $abc-qd0$. Al final se plantea el problema de control en la máquina de inducción, donde se define la función de costo para controlar el par y el flujo de la máquina evaluando todos los vectores disponibles que puede entregar el inversor. Todos estos temas son relevantes para la implementación de una metodología FSC-MPC donde con base en un modelo de predicción que toma todas las entradas finitas del sistema, que en este caso son los vectores de tensión, se evalúan en una función de costo y la entrada que minimice esta función se deberá de seleccionar para cumplir con los objetivos de control del sistema.

Capítulo 3

Control FCS-MPS aplicado a la máquina de inducción

3.1. Introducción

Como ya se explicó, el control FCS-MPC es una metodología de control que con base en un criterio de optimización evalúa el conjunto finito de entradas para seleccionar la entrada que más convenga a los objetivos de control del sistema. En este capítulo se aplicará un control FCS-MPC a una máquina de inducción alimentada por un inversor multinivel, en este caso el control evaluará todos los posibles vectores de tensión que puede entregar el inversor. Se realizarán pruebas tomando en cuenta diferentes objetivos y en cada una de las pruebas se considerarán inversores de 2, 3, 4 y 5 niveles. Al final se presentan las conclusiones.

3.2. Implementación del control FSC-MPC

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de control aplicando la metodología FCS-MPC para una máquina de inducción alimentada por un inversor multinivel, donde los flujos del estator $\vec{\psi}_s$ y $\vec{\psi}_r$ son estimados a partir de la medición de las corrientes de línea i_{as} e i_{bs} . Los valores de los flujos obtenidos se utilizan en el modelo predictivo, que calcula los valores del par y flujo en el siguiente tiempo de muestreo para cada uno de los posibles estados de conmutación del inversor.

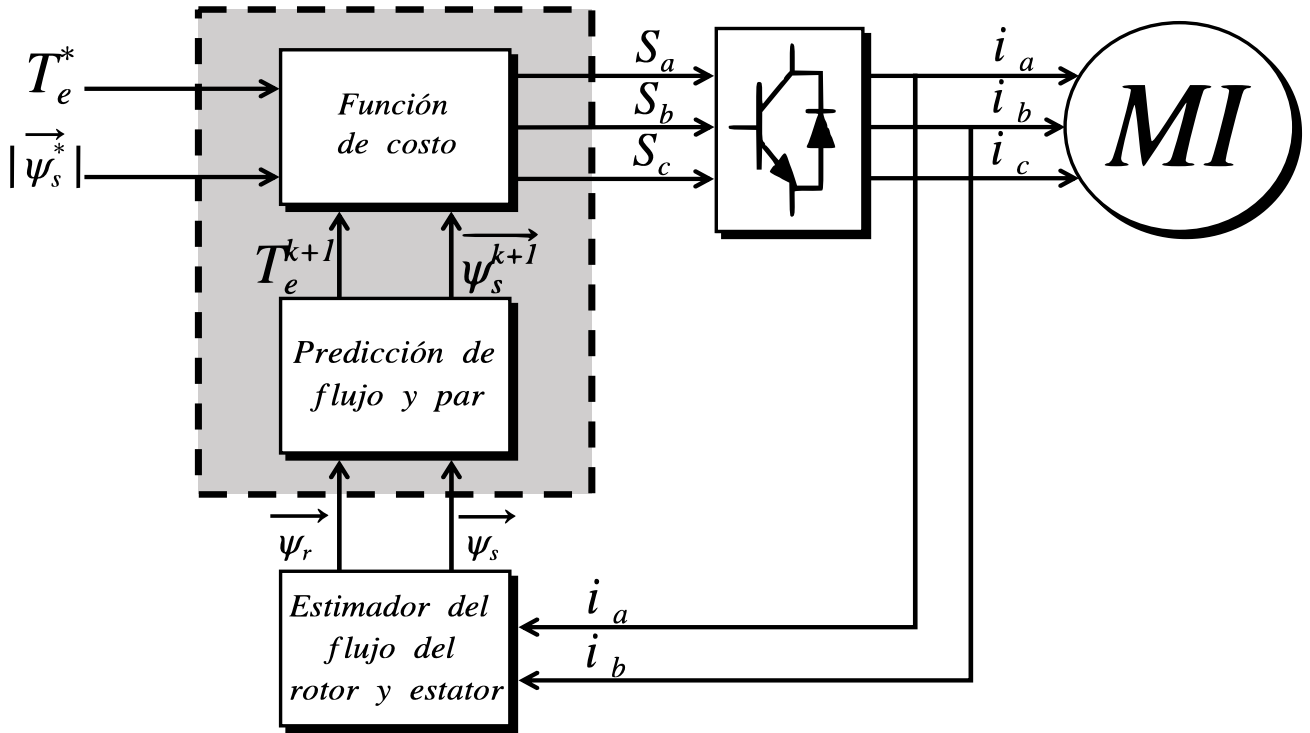


Figura 3.1: Diagrama de control aplicando metodología FSC-MPC a un motor de inducción alimentado por inversores multinivel.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo donde se detalla la metodología del control predictivo aplicado al motor de inducción. Primeramente se inicia con la medición de las corrientes del estator i_{as} e i_{bs} , con base en esto se estima la magnitud de los flujos del estator y del rotor $\vec{\psi}_s$, $\vec{\psi}_r$, respectivamente. Posteriormente estos valores se introducen en un ciclo donde el número de iteraciones estará definido por la cantidad de vectores de tensión que pueda entregar el inversor, en cada ciclo se evaluará el par y el flujo un instante adelante $[k + 1]$ para la entrada de tensión correspondiente. Por último, los valores de par y flujo se introducen en una función de

costo J , donde el vector de tensión que minimice la función de costo, de acuerdo con los objetivos de control será seleccionado y aplicado al sistema.

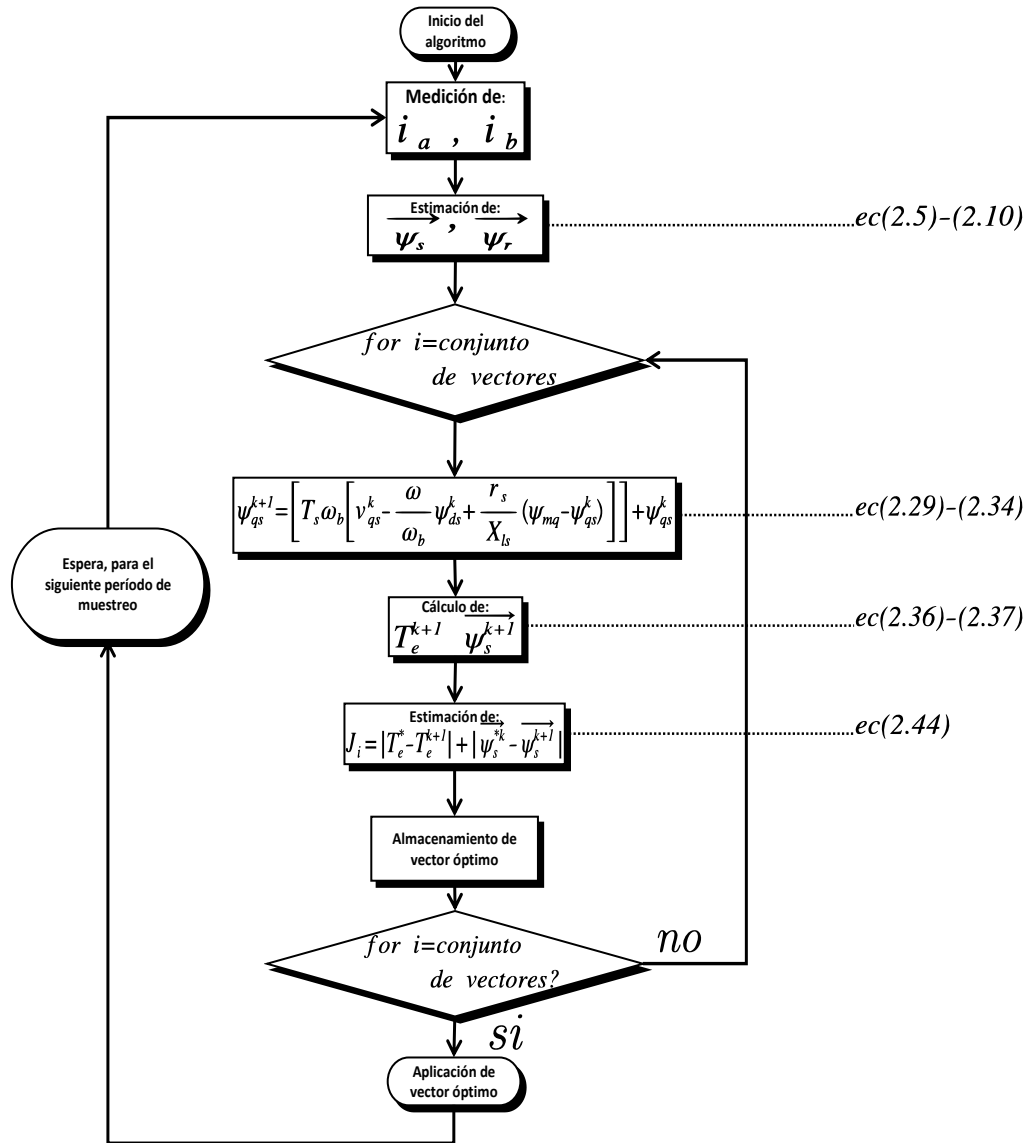


Figura 3.2: Diagrama de flujo para la implementación de la metodología FSC-MPC en la máquina de inducción.

3.3. Pruebas realizadas

A continuación, se presentan las pruebas para evaluar el desempeño del control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas FSC-MPC aplicado a un motor de inducción alimentado por inversores de 2, 3, 4 y 5 niveles. La tabla 2.1 muestra los parámetros de la máquina. En estas pruebas las condiciones iniciales del par y flujo son cero, además se evaluará la totalidad de los vectores de tensión disponibles y se realizarán pruebas con $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

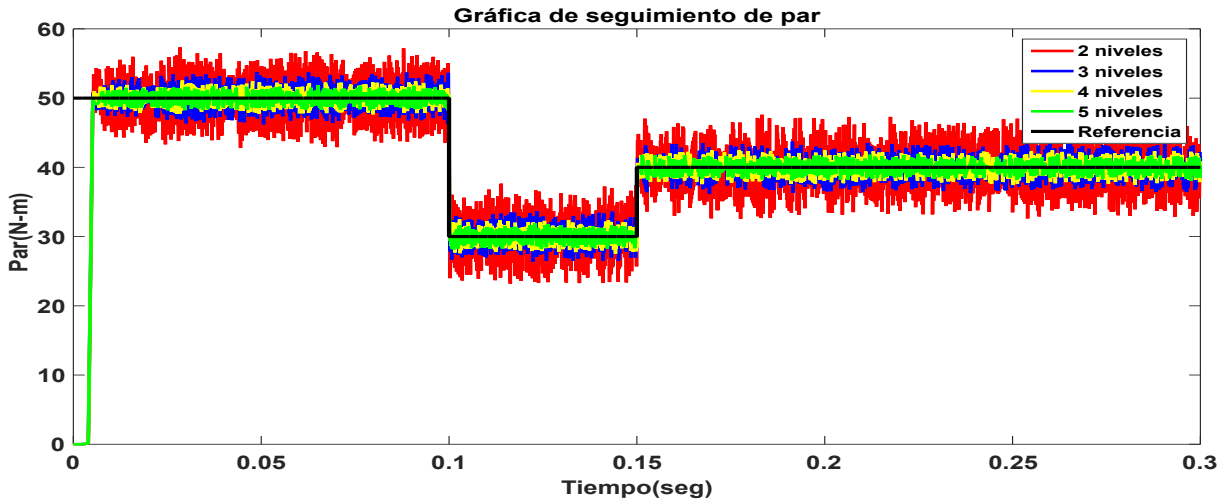
3.3.1. Prueba 1.- Tren de par

En esta prueba se evalúa la respuesta del control ante un tren de par de referencia. Se demanda una secuencia de par de 50 - 30 - 40 N-m, con un intervalo de 0 - 0.1 - 0.15 s entre cada cambio de magnitud, con una referencia de flujo de 0.8 webers, con un intervalo de 0 - 0.3 s, el tiempo de simulación será de 0.3 segundos.

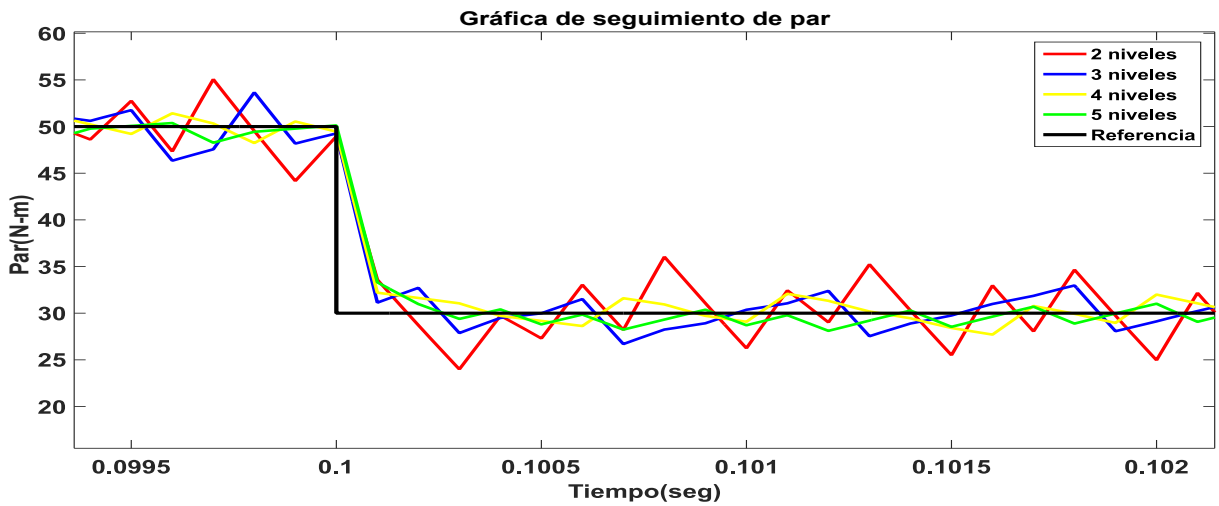
Par T_e - Velocidad angular ω_r

A continuación, se muestran los resultados correspondientes al seguimiento de par, con diferentes niveles de tensión. Los resultados para un inversor de dos niveles se muestran en color rojo, para tres niveles en color azul, para cuatro niveles en amarillo y en verde para cinco niveles. La referencia se da en el trazo de color negro.

En la figura 3.3 se muestra el seguimiento de par aplicando control FSC-MPC a la máquina de inducción alimentada por diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$. En la figura 3.3(a) se observa un correcto seguimiento entre la referencia del par T_e^* y el par medido T_e . También en la figura 3.3(b) se observa que al demandar un cambio en la magnitud del par en $t = 1s$, el sistema llega a su referencia en un tiempo menor de 0.0005s para los diferentes niveles de tensión que puede aportar el inversor; sin embargo a medida que aumenta el número de niveles de tensión hay una reducción del error entre la referencia del par T_e^* y el par medido T_e .



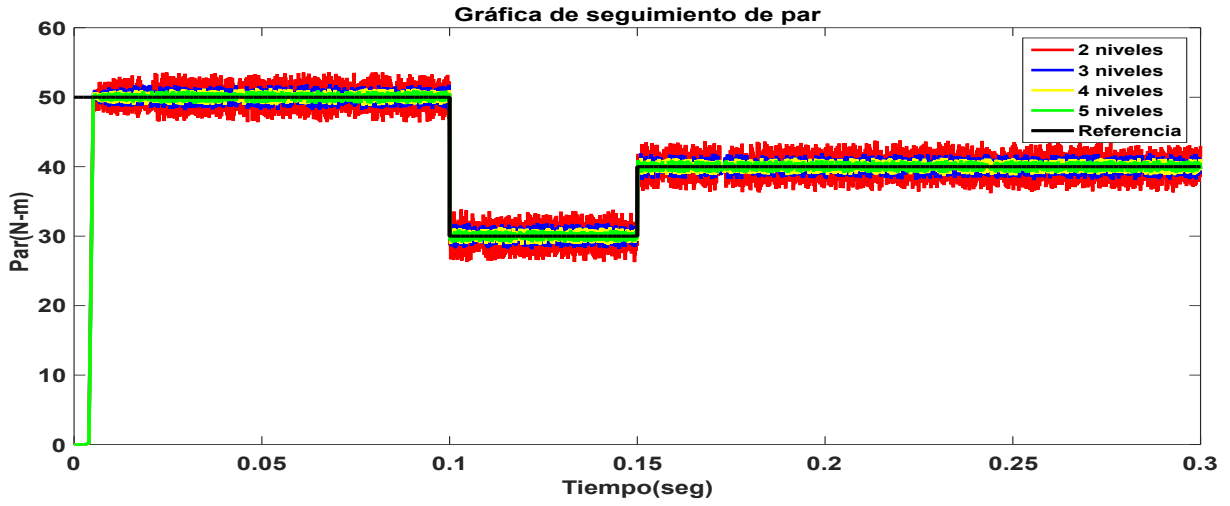
(a) Seguimiento de par para diferentes niveles de tensión.



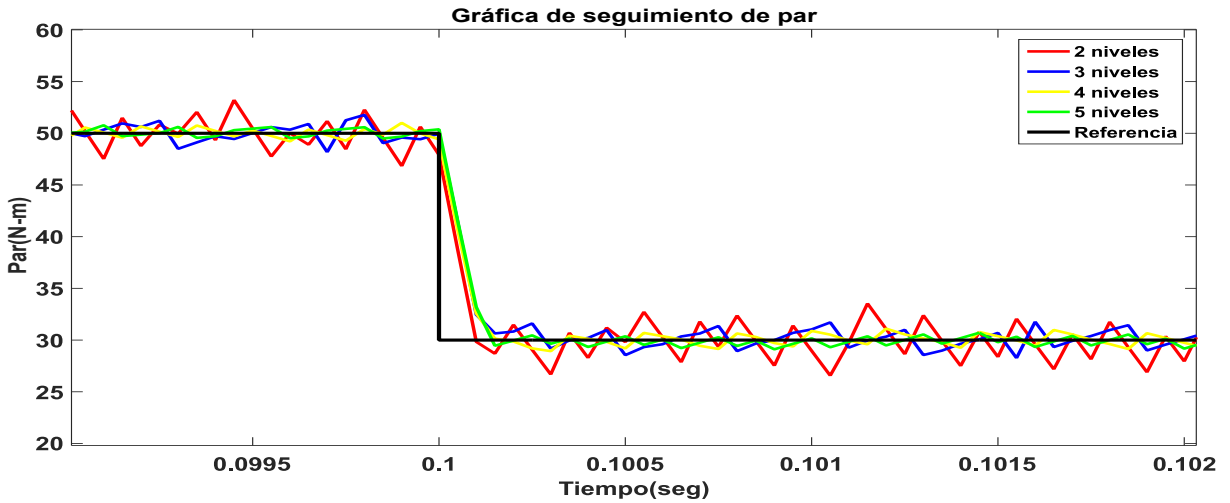
(b) Detalle en el cambio de escalón.

Figura 3.3: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 1.

En la figura 3.4 se muestra el seguimiento de par aplicando control FSC-MPC a la máquina de inducción alimentada por diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$. Se aprecia en la figura 3.4(a) que el sistema tiene un correcto seguimiento de par para los diferentes niveles de tensión y en la figura 3.4(b) se muestra que el transitorio del par no tiene mayor cambio respecto a la simulación anterior empleando un $T_s = 100\mu s$ ya que al cambio de referencia en el tiempo $t = 1s$ ambos sistemas convergen en menos de $0.0005s$. Sin embargo, un cambio que se puede apreciar es que al disminuir el tiempo de muestreo el error del par disminuye.



(a) Seguimiento de par para diferentes niveles de tension.



(b) Detalle en el cambio de escalón.

Figura 3.4: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 1.

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados de los errores RMS promedio del par para diferentes niveles de tensión y sus porcentajes de reducción tomando como base el sistema alimentado por el inversor de 2 niveles. Se observa que a medida que aumenta el número de niveles de tensión, el valor RMS del error del par disminuye, obteniendo la máxima reducción de 74 % al utilizar el convertidor de 5 niveles. También se aprecia que al reducir el tiempo de muestreo, de $T_s = 100\mu s$ a $T_s = 50\mu s$, se logra disminuir un 50 % el error RMS del par.

Resultados				
Convertidor	Tiempo de muestreo = $100\mu s$		Tiempo de muestreo = $50\mu s$	
	Error RMS del par	%Reducción	Error RMS del par	%Reducción
2 niveles	3.3262	Base	1.6534	Base
3 niveles	1.6402	49.70 %	0.8283	49.80 %
4 niveles	1.1176	64.36 %	0.5337	66.00 %
5 niveles	0.8162	74.00 %	0.4125	75.46 %

Tabla 3.1: Error promedio de par y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 1.

En la figura 3.5 se muestra la velocidad angular de la máquina con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$. Se observa que a los diferentes cambios de par la pendiente de la velocidad aumenta o disminuye, también se puede apreciar que independientemente de los niveles de tensión que pueda aportar el inversor el comportamiento en la velocidad es el mismo.

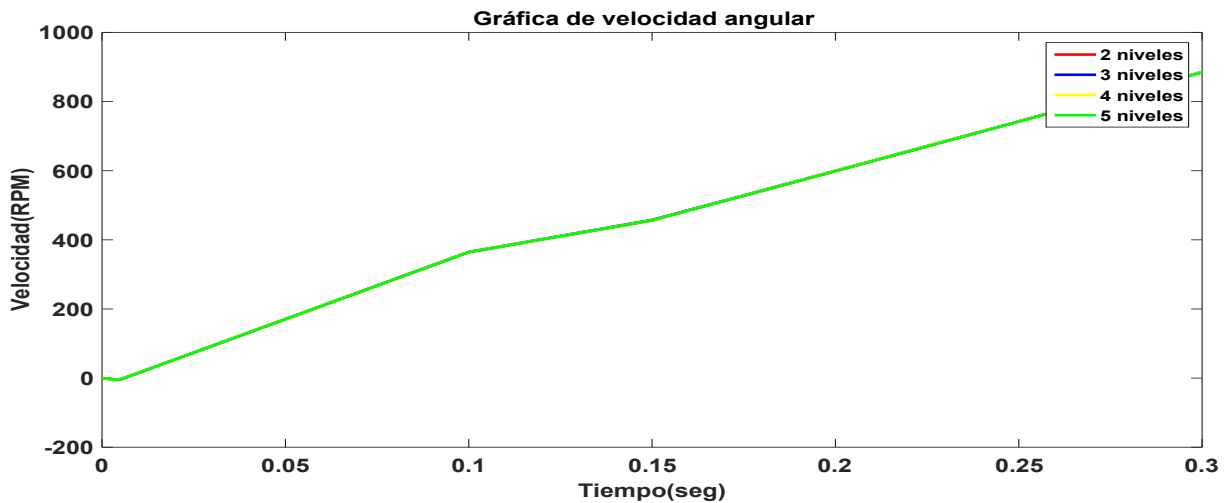
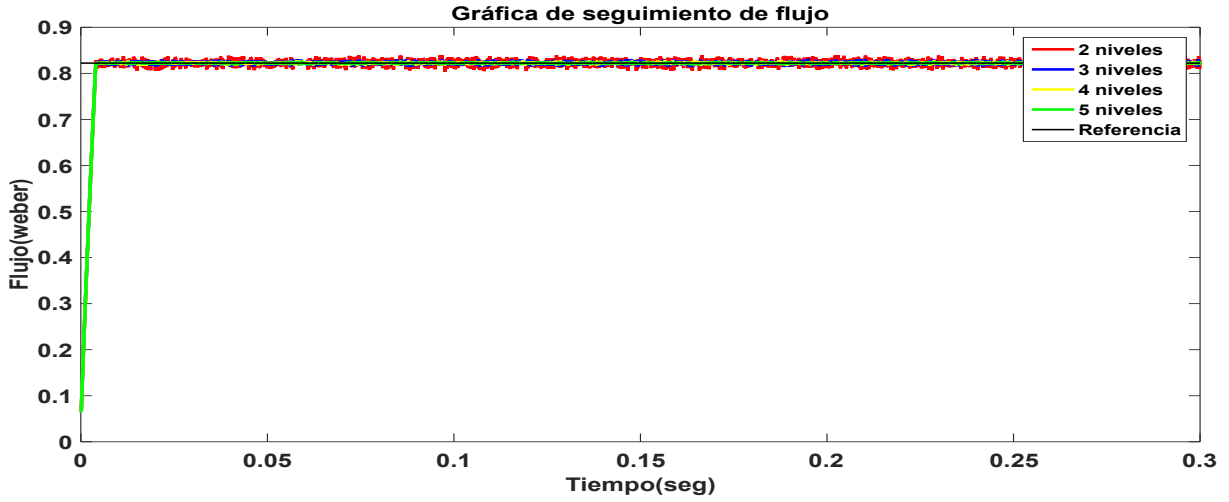


Figura 3.5: Velocidad angular aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 1.

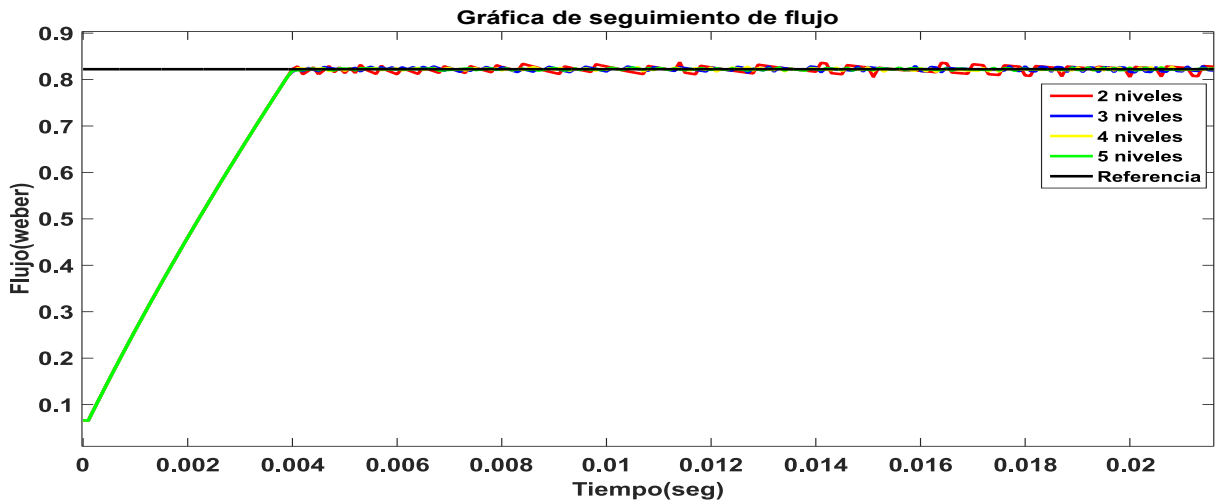
Flujo en el estator ψ_s

En la figura 3.6 se muestra el seguimiento de flujo con un $T_s = 100\mu s$. Se observa en la figura 3.6(b) que el flujo del estator alcanza rápidamente el valor de la referencia de 0.8 webers en un tiempo de 0.004s, además en la figura 3.6(a) se logra apreciar que, a pesar de los cambios de referencia en el par, el flujo se mantiene constante durante todo el tiempo de simulación. También se observa que a medida que aumenta el número de niveles de tensión que puede aportar el inversor

hay una reducción del error entre referencia del flujo $\vec{\psi}_s^*$ y el flujo del estator $\vec{\psi}_s$.



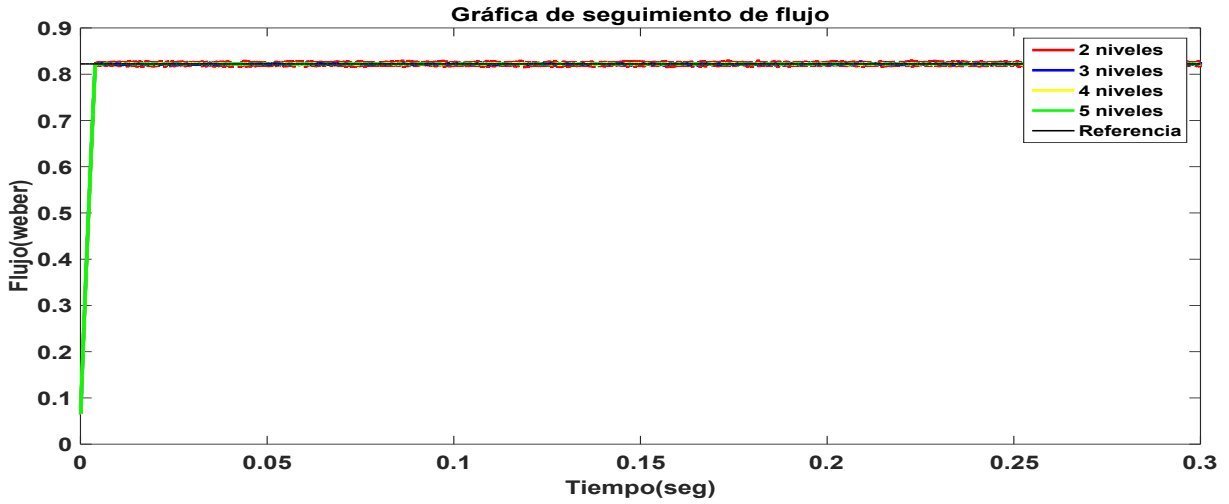
(a) Seguimiento de flujo para diferentes niveles de tensión.



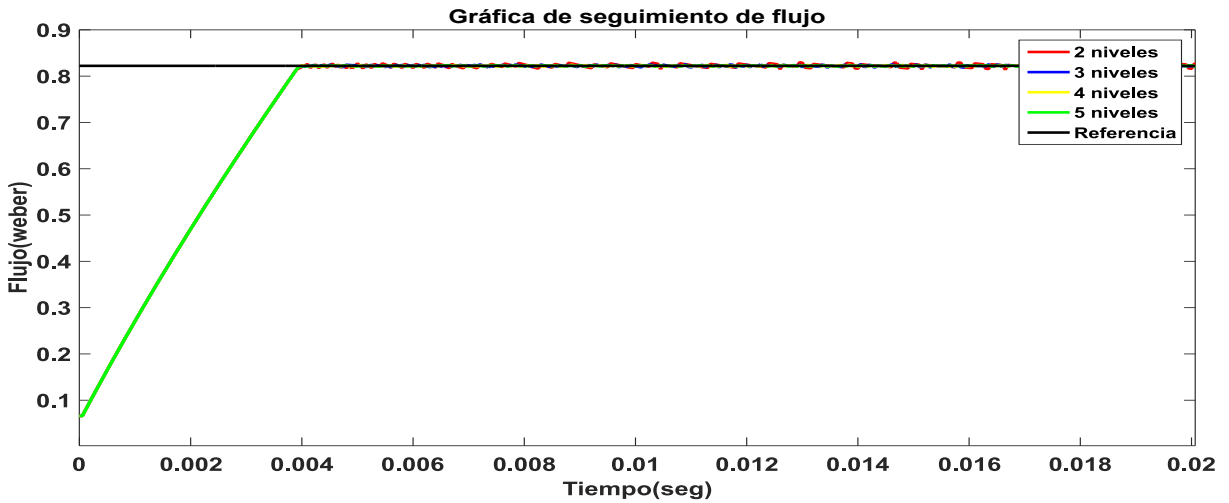
(b) Detalle en el cambio de escalón.

Figura 3.6: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 1.

En la figura 3.7 se muestra el seguimiento de flujo de referencia con un $T_s = 50\mu s$. Se observa que el transitorio es el mismo para los dos tiempos de muestreo usados, sin embargo el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta menor error en el seguimiento del flujo.



(a) Seguimiento de flujo para diferentes niveles de tensión.



(b) Detalle en el cambio de escalón.

Figura 3.7: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 1.

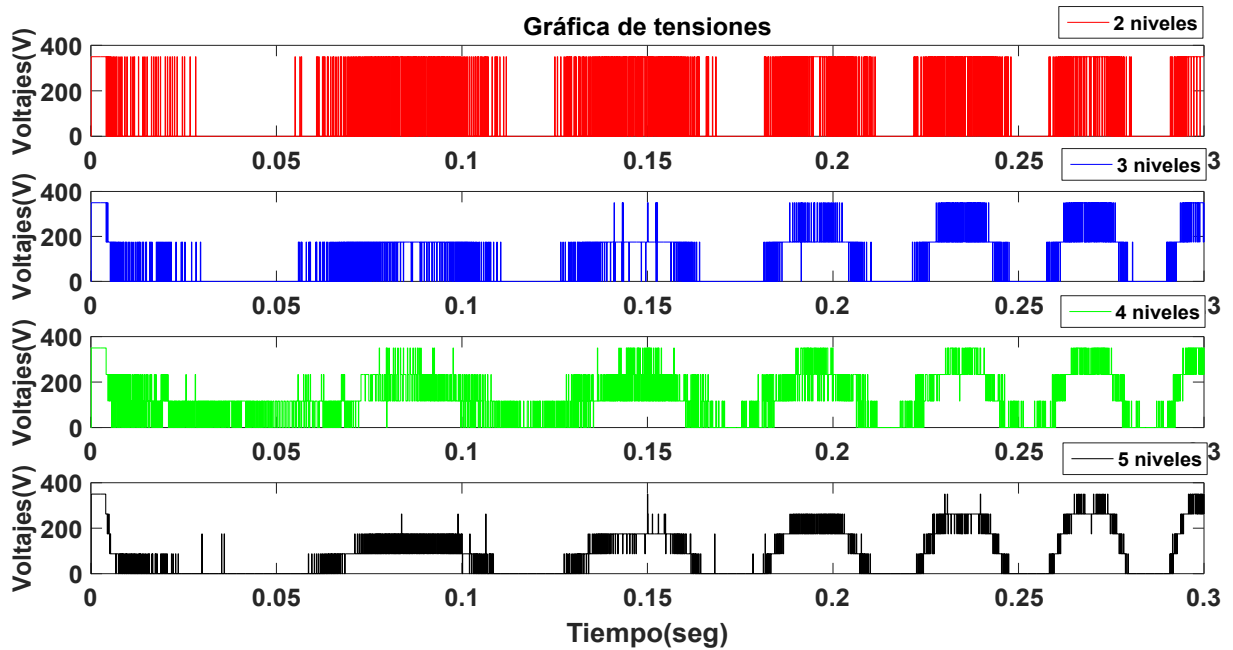
A continuación, en la tabla 3.2 se muestran los resultados de los errores RMS promedio del flujo para diferentes niveles de tensión y sus porcentajes de reducción tomando como base el sistema alimentado por el inversor de 2 niveles. Es preciso señalar que a medida que aumenta el número de niveles, el valor RMS del error del flujo disminuye, obteniendo la máxima reducción de 70 %, al utilizar el convertidor de 5 niveles. Al mismo tiempo se observa que se puede disminuir aún más el error disminuyendo el tiempo de muestreo a $T_s = 50\mu s$.

Resultados				
Convertidor	Tiempo de muestreo = $100\mu s$		Tiempo de muestreo = $50\mu s$	
	Error RMS del flujo	%Reducción	Error RMS del flujo	%Reducción
2 niveles	0.0068	Base	0.0035	Base
3 niveles	0.0036	47.05 %	0.0017	51.48 %
4 niveles	0.0023	66.17 %	0.0012	65.71 %
5 niveles	0.0018	73.52 %	0.0008	77.46 %

Tabla 3.2: Error promedio de flujo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 1.

Tensiones en el estator V_s

Continuando con el análisis, en la Figura 3.8 y 3.9 se muestran las tensiones de salida del inversor (tensión de fase con respecto a la referencia de DC) para cada tipo de inversor con un $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. En estas figuras se aprecian los diferentes niveles discretos de tensión de acuerdo con el tipo de inversor usado. Es evidente que el gradiente de tensión visto por los devanados de la máquina disminuye al aumentar el número de niveles de tensión. Note que los cambios de nivel no siempre son entre niveles adyacentes, de modo que más adelante se propondrá un método para mejorar esta situación.

Figura 3.8: Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

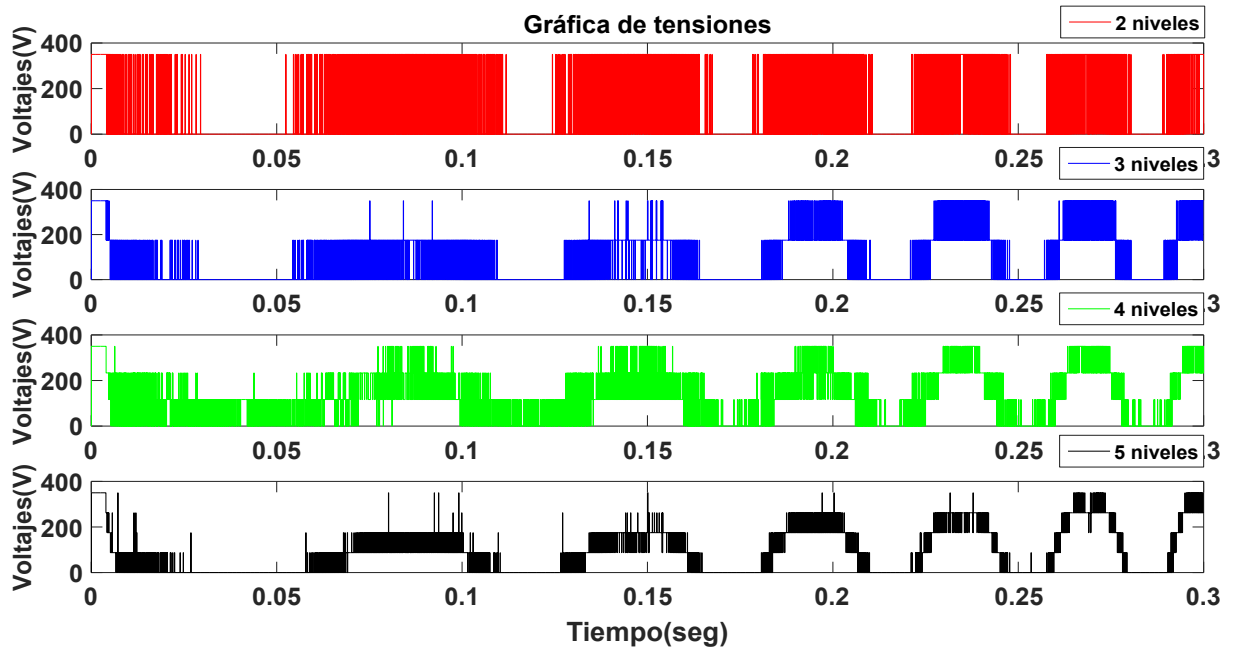


Figura 3.9: Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

A continuación, en la tabla 3.3 se muestra el total de vectores a evaluar y el incremento en %, estos se comparan con respecto al convertidor de 2 niveles. Es preciso señalar que a medida que aumenta el número de niveles, mayor es el número de vectores a evaluar, obteniendo el máximo incremento de 1462.5 %, al utilizar el convertidor de 5 niveles.

Resultados			
Convertidor	Número de vectores a evaluar	Incremento en operaciones	Incremento
2 niveles	8	Base	Base
3 niveles	27	19	237.5 %
4 niveles	64	56	700 %
5 niveles	125	117	1462.5 %

Tabla 3.3: Total de vectores a evaluar y el incremento en % con respecto al caso base de 2N - Prueba 1.

En la tabla 3.4 se muestra el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión. Los resultados muestran que a mayor número de niveles de tensión que puede entregar el inversor menor es el número de conmutaciones por fase, sin embargo, a mayor

número de niveles de tensión que puede entregar el inversor aumenta el número de saltos en más de un nivel de tensión.

Convertidor	Resultados											
	Tiempo de muestreo de $=T_s = 100$						Tiempo de muestreo de $=T_s = 50$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
2 Niveles	1183	1202	1272	na	na	na	2362	2510	2500	na	na	na
3 Niveles	1024	1190	1182	13	10	12	2074	2355	2342	26	25	32
4 Niveles	1020	1055	1042	22	20	18	2085	2123	2295	44	49	40
5 Niveles	1015	992	1122	28	31	25	2096	1992	2218	71	68	50

Tabla 3.4: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 1.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 3.10-3.13, se muestran las corrientes de fase del estator con un $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde, se observa que al aumentar la velocidad angular de la máquina hace que la frecuencia de la corriente del estator aumente.

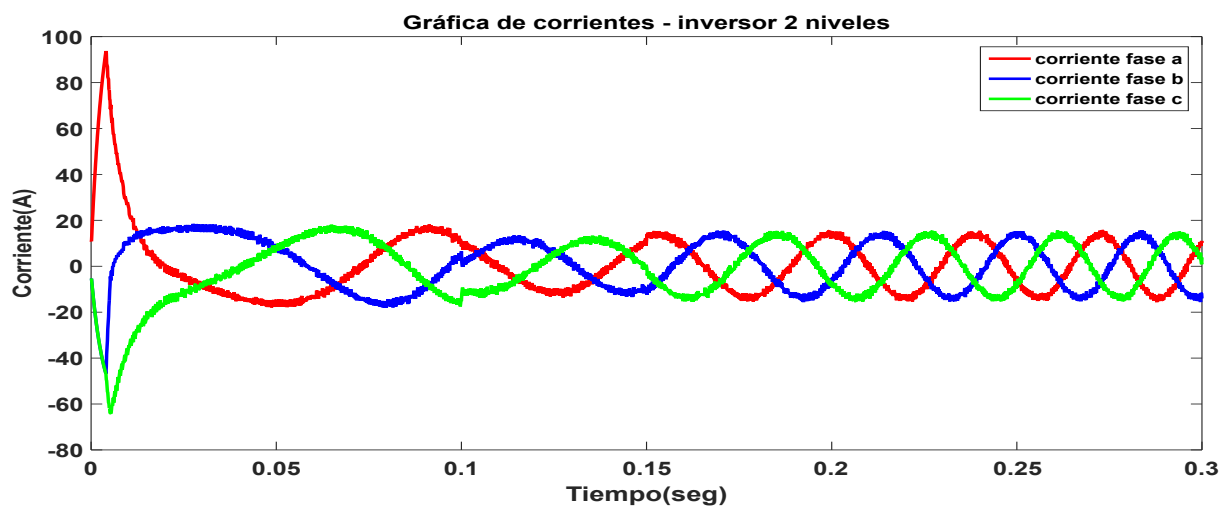


Figura 3.10: Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

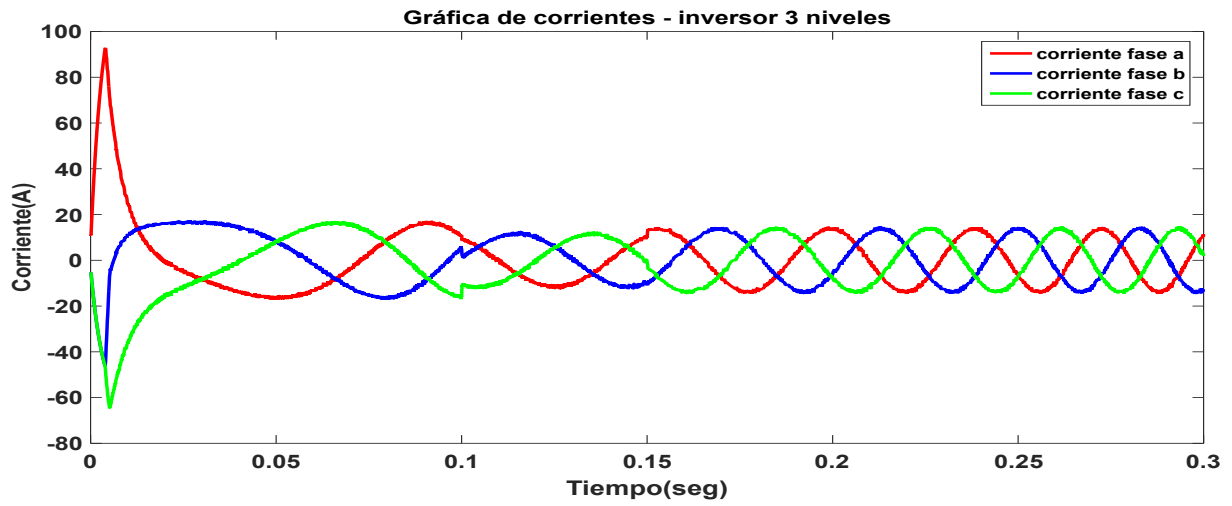


Figura 3.11: Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

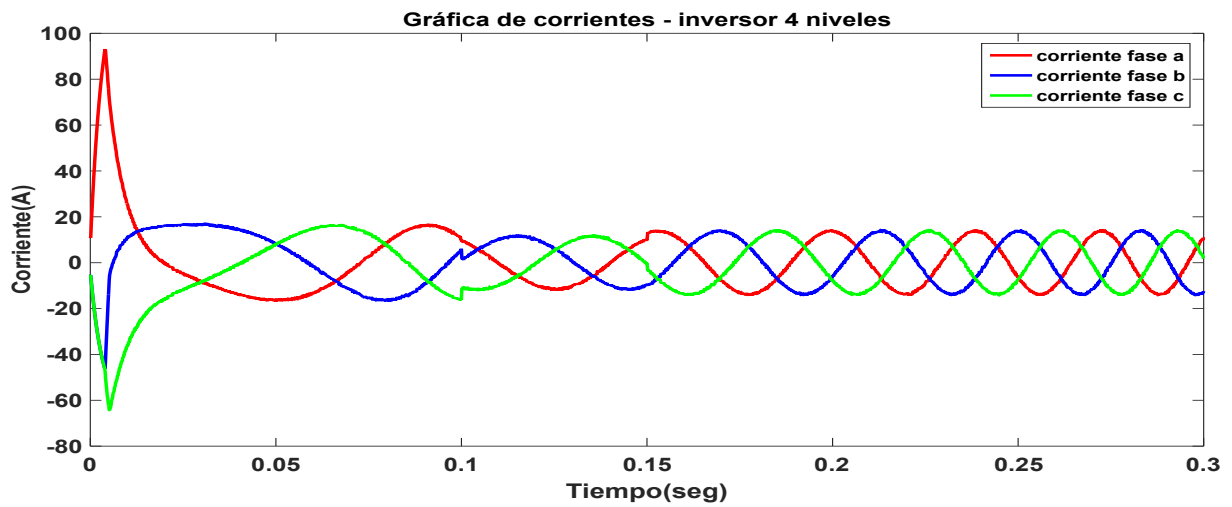


Figura 3.12: Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

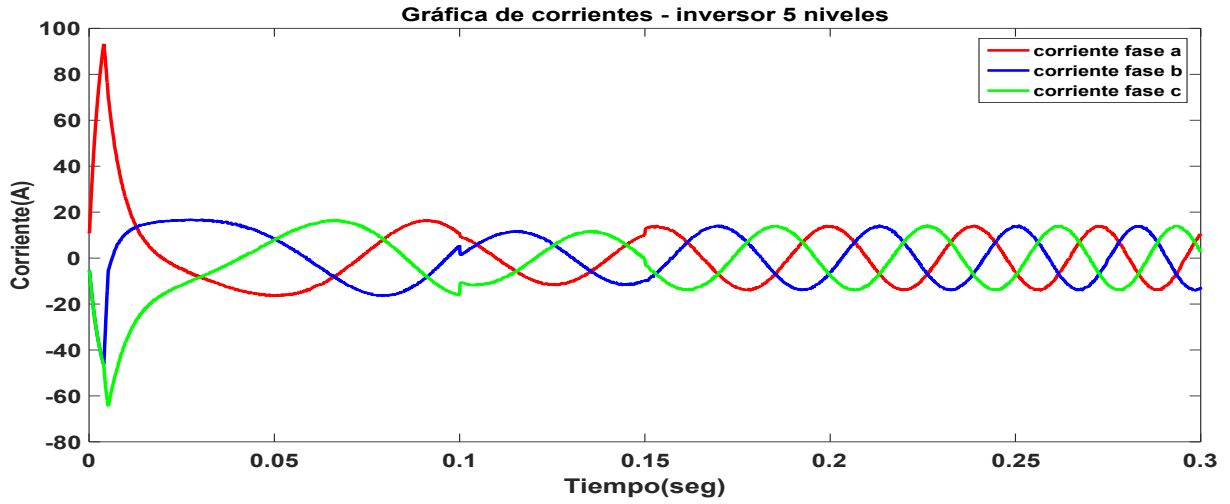


Figura 3.13: Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

En las figuras 3.14-3.17, se muestran las corrientes de fase del estator con un $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase a se muestran en color rojo, para la fase b en color azul y para la fase c en color verde, se observa igualmente, que al aumentar la velocidad angular de la máquina hace que la frecuencia de la corriente del estator aumente. También se aprecia que al disminuir el tiempo de muestreo y al aumentar los número de niveles el rizo en la corriente disminuye, estos datos se presentan más adelante.

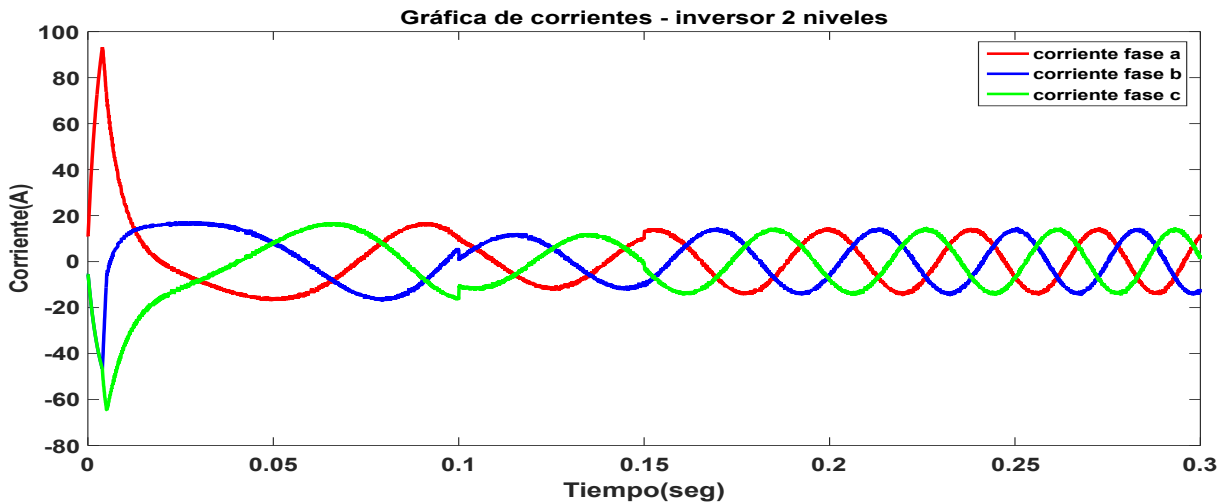


Figura 3.14: Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

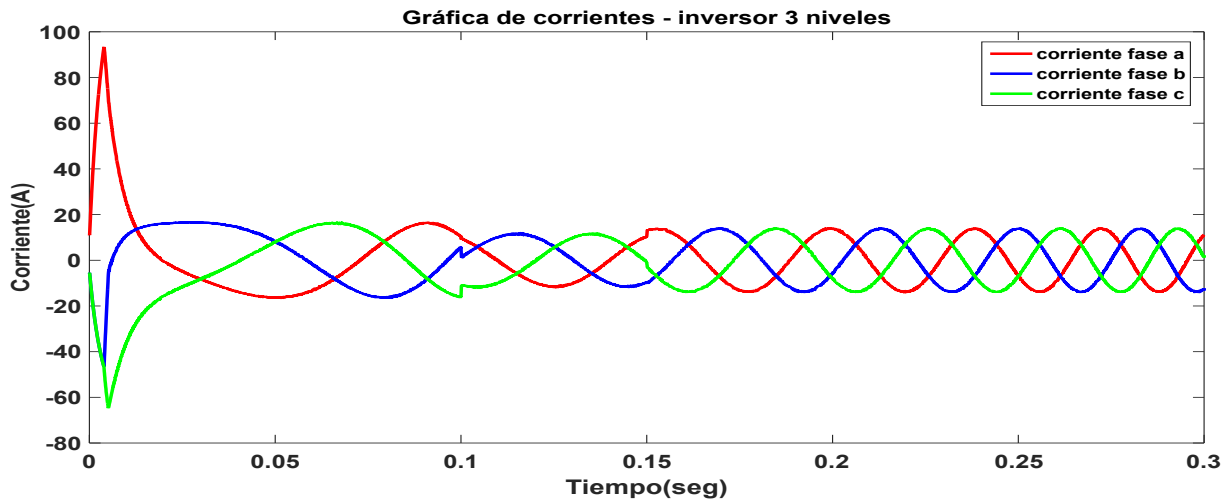


Figura 3.15: Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

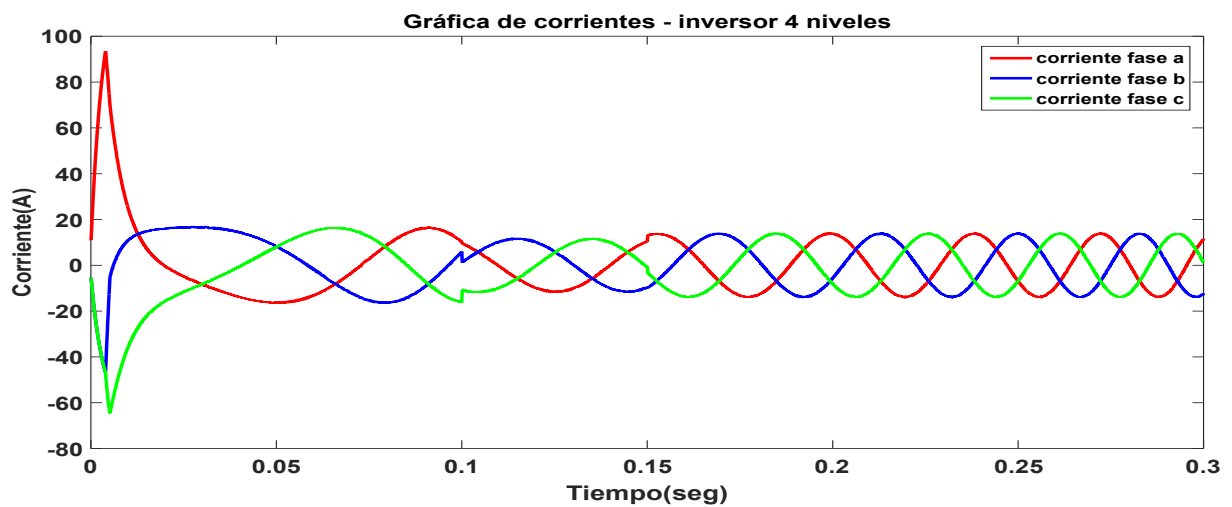


Figura 3.16: Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

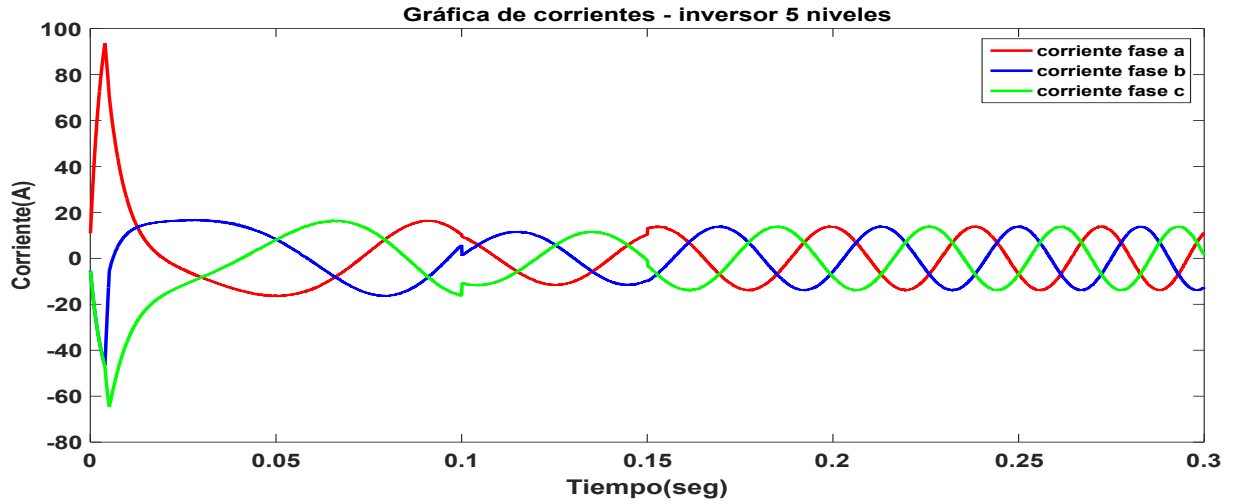


Figura 3.17: Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

En la tabla 3.5 se presenta el valor del rizo máximo en las corrientes del estator, los resultados se comparan con los obtenidos por el convertidor de 2 niveles. Los resultados indican que al aumentar los niveles de tensión que aporta el inversor se logra reducir el rizo de la corriente hasta un 66% tomando como base el inversor de 2 niveles. También otra forma en la que se puede reducir aún más el valor del rizo es disminuyendo el tiempo de muestreo.

Resultados				
Convertidor	Tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$		Tiempo de muestreo $T_s = 50\mu s$	
	Valor del rizo máximo	Reducción	Valor del rizo máximo	Reducción
2 niveles	3.78 A	Base	2.00 A	Base
3 niveles	2.60 A	31.211 %	1.35 A	32.5 %
4 niveles	1.71 A	54.76 %	0.83 A	58.5 %
5 niveles	1.27 A	66.40 %	0.66 A	67.00 %

Tabla 3.5: Valor del rizo máximo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 1.

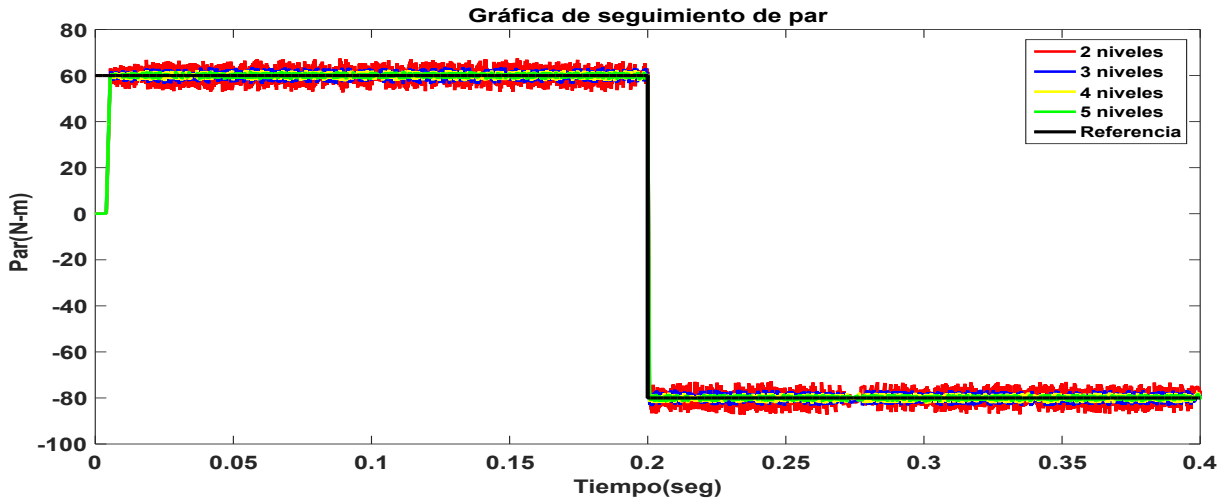
3.3.2. Prueba 2.-Inversión de par

La segunda prueba, consiste en un cambio de signo en el par de referencia (inversión del sentido de giro). Se inicia con un par de referencia de 60 N-m, y en $t = 0.2s$ la referencia de par se cambia a -80 N-m. Esto frenará al motor e invertirá el sentido de giro. También se demanda un flujo de 0.8 webers desde el inicio de la prueba. Las pruebas se realizarán con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ y con un tiempo de simulación de 0.4 segundos.

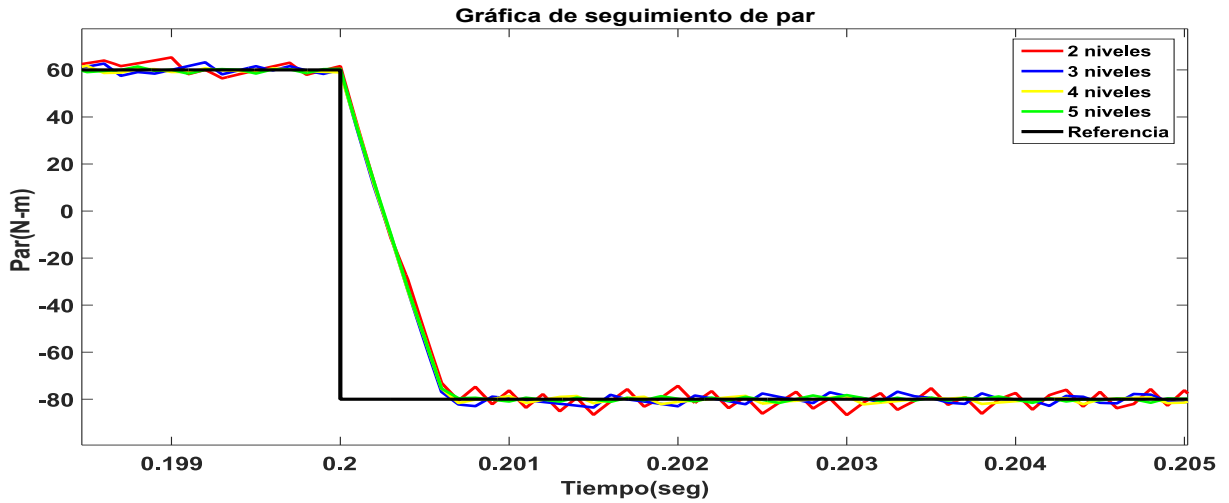
En los resultados, el sistema alimentado por un inversor de dos niveles se muestra con una traza de color rojo, tres niveles color azul, cuatro niveles color amarillo y cinco niveles de color verde, siguiendo la referencia mostrada con una traza de color negro.

Par T_e - Velocidad angular ω_r

En la figura 3.18 se muestra el comportamiento del par de la máquina de inducción alimentado con inversores multinivel aplicando un control FCS-MPC con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se observa que el sistema sigue correctamente la referencia de par a pesar del cambio de signo que se presenta en el $t = 0.2s$, también al igual que en la prueba anterior al aumentar los niveles de tensión que puede entregar el inversor se observa que el error del par disminuye.



(a) Seguimiento de par para diferentes niveles de tensión.



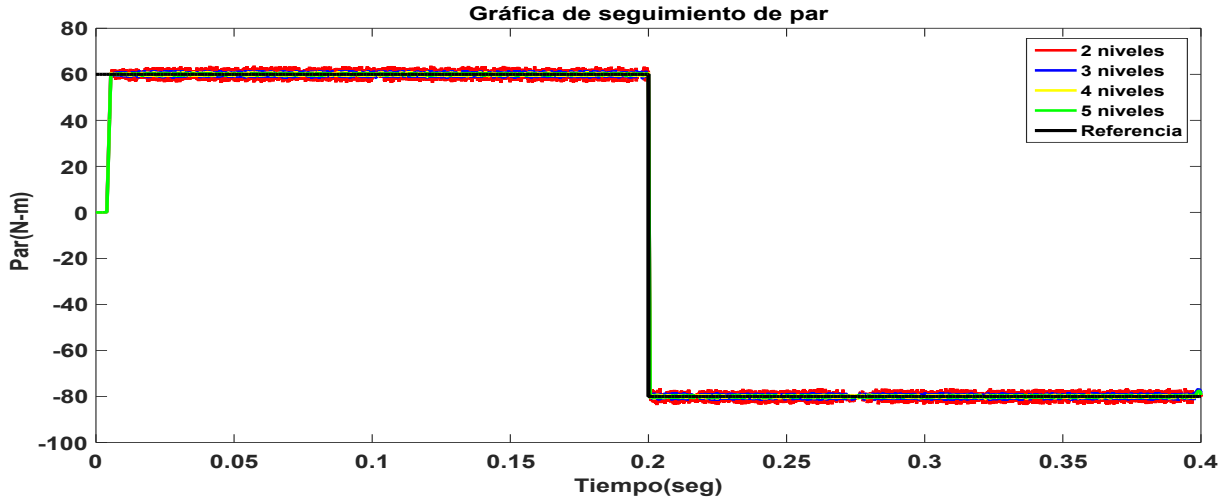
(b) Detalle en el cambio de escalón.

Figura 3.18: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

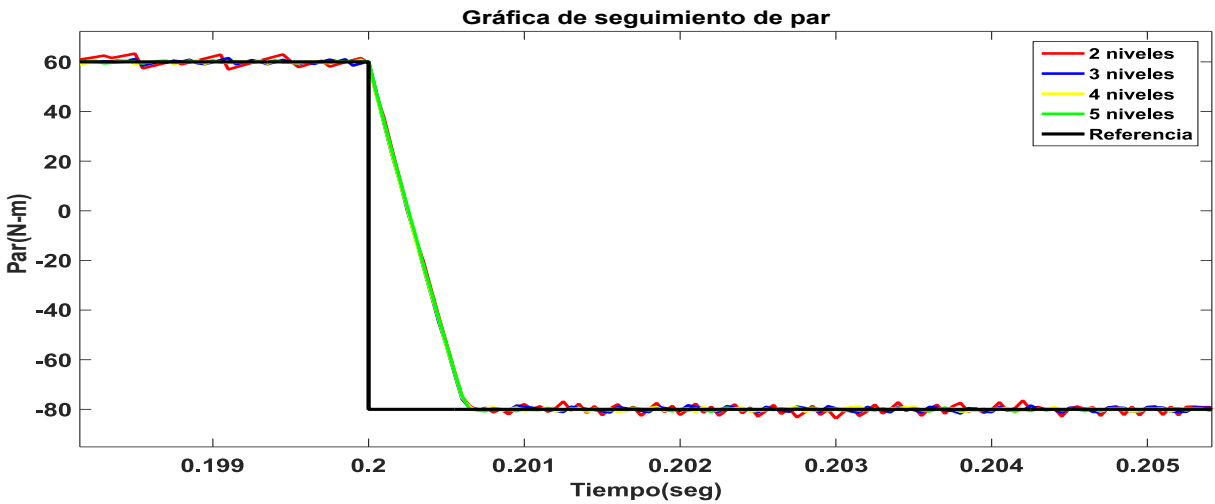
En la figura 3.19 se muestra el comportamiento del par con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Se observa en la figura 3.19(a) que el sistema sigue correctamente la referencia de par a pesar del cambio de signo que se presenta en el tiempo $t = 0.2$ s. También se observa que al aumentar los niveles de tensión el error del par disminuye.

Se aprecia en la 3.19(b) que al disminuir el tiempo de muestreo a $T_s = 50\mu$ no afecta en el transitorio del sistema ya que ambas simulaciones de esta misma prueba, al cambio de escalón en

el $t = 0.2s$, convergen a la referencia en menos de $0.001s$, sin embargo al disminuir el tiempo de muestreo el error que hay entre la referencia de par T_e^* y el par de la maquina T_e disminuye aún más comparado con simulación anterior de esta misma prueba.



(a) Seguimiento de par para diferentes niveles de tensión.



(b) Detalle en el cambio de escalón.

Figura 3.19: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

La Tabla 3.6 presenta los resultados de los errores RMS promedio del par para diferentes niveles de tensión y sus porcentajes de reducción tomando como base el sistema alimentado por el inversor de 2 niveles. Se observa que al aumentar los niveles de tensión que aporta el inversor la reducción del error puede disminuir hasta un 74 %. También otra forma en la que se puede reducir

aún más el error es disminuyendo el tiempo de muestreo.

Resultados				
Convertidor	Tiempo de muestreo = $100\mu s$		Tiempo de muestreo = $50\mu s$	
	Error RMS del par	%Reducción	Error RMS del par	%Reducción
2 niveles	3.2323	Base	1.6451	Base
3 niveles	1.5741	%49.70	0.8886	%49.80
4 niveles	1.0875	%64.36	0.5766	%66.00
5 niveles	0.8405	%74.00	0.4826	%75.46

Tabla 3.6: Error promedio de par y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 2.

Adicionalmente, en la figura 3.20 muestra la velocidad angular de la máquina con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se observa que aplicando un par positivo se alcanza una velocidad positiva máxima de aproximadamente 1000 RPM en un tiempo de 0.2s y al invertir el signo del par de referencia, la máquina invierte su giro y su pendiente se hace negativa; posteriormente alcanza una velocidad aproximada de -1000 RPM, este mismo comportamiento se presentó en ambas simulaciones con diferentes tiempos de muestreo.

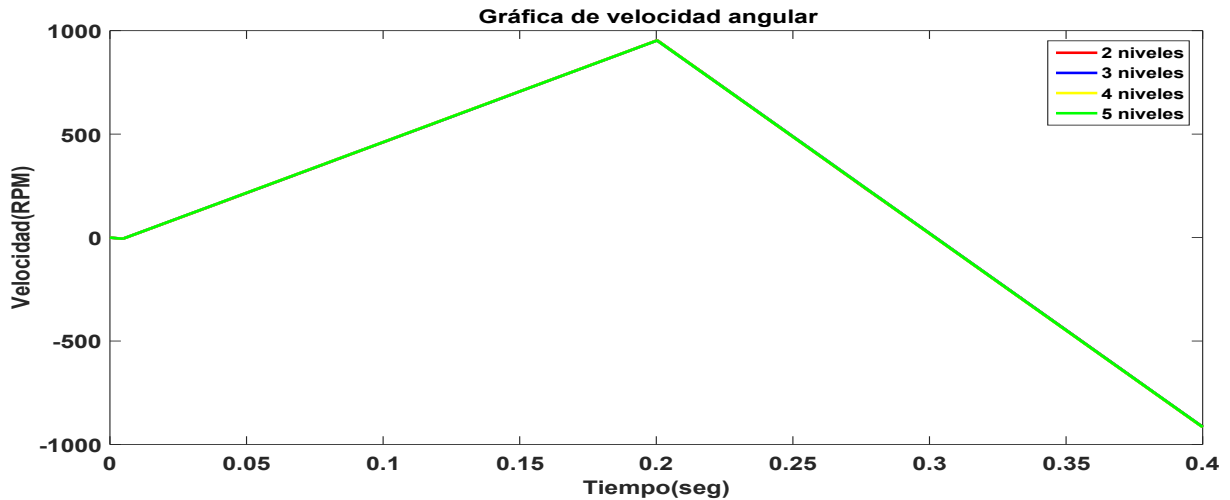
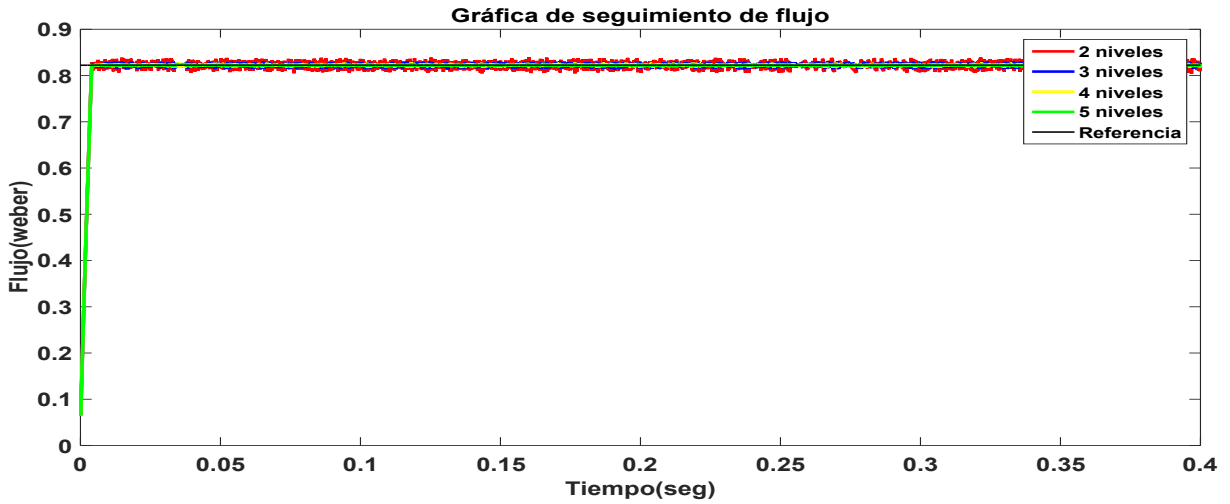


Figura 3.20: Velocidad angular aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con - Prueba 2.

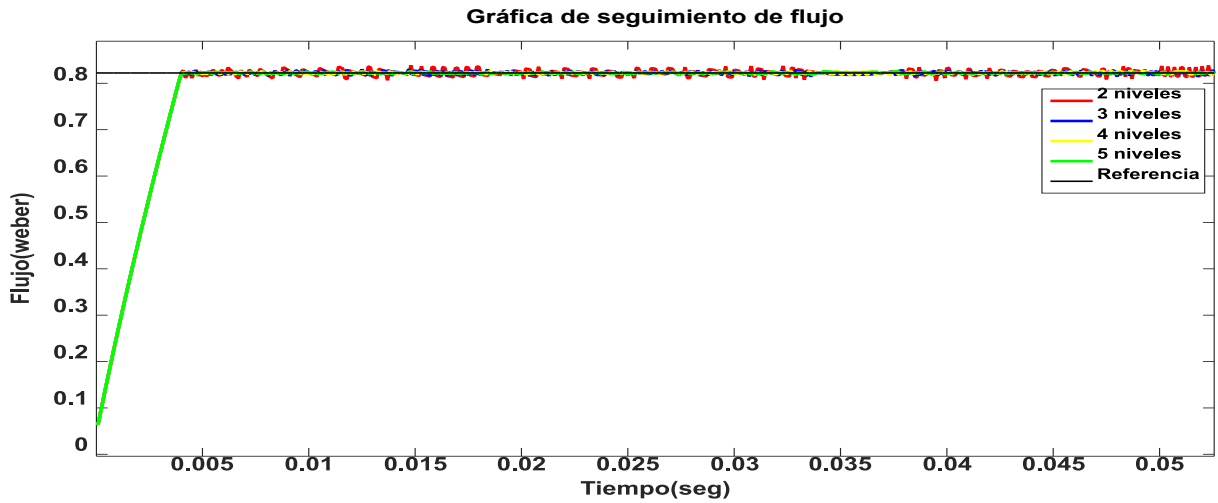
Flujo en el estator ψ_s

En la figura 3.21 se muestra el comportamiento del flujo del estator de la máquina de inducción con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se observa que la respuesta del sistema es rápida ya

que el flujo del estator llega a su referencia en $0.004s$ y a pesar del cambio del signo de par y el cambio del giro en el rotor, el flujo se mantiene constante durante toda de la prueba.



(a) Seguimiento de flujo para diferentes niveles de tensión.

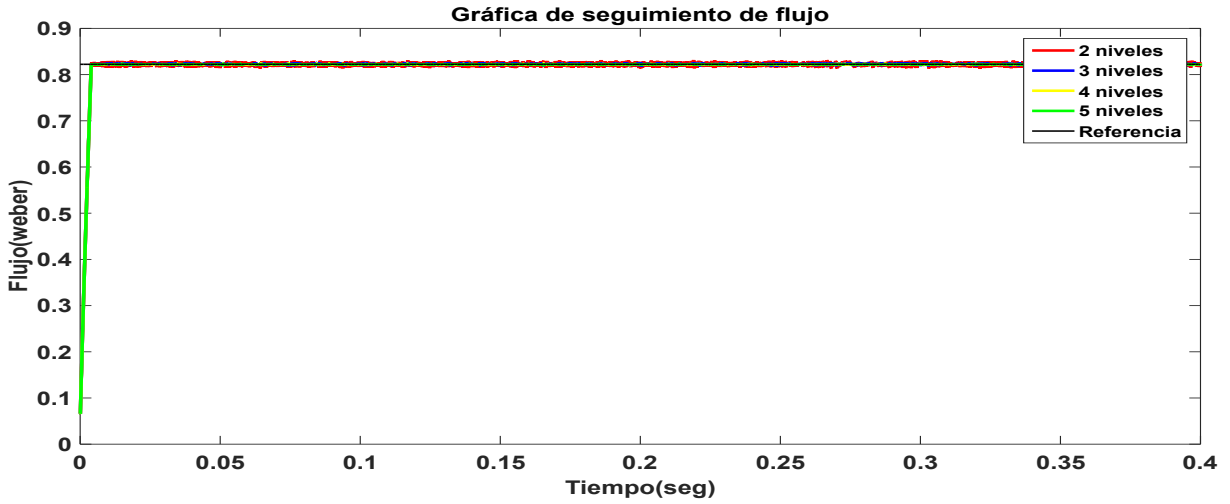


(b) Detalle en el cambio de escalón.

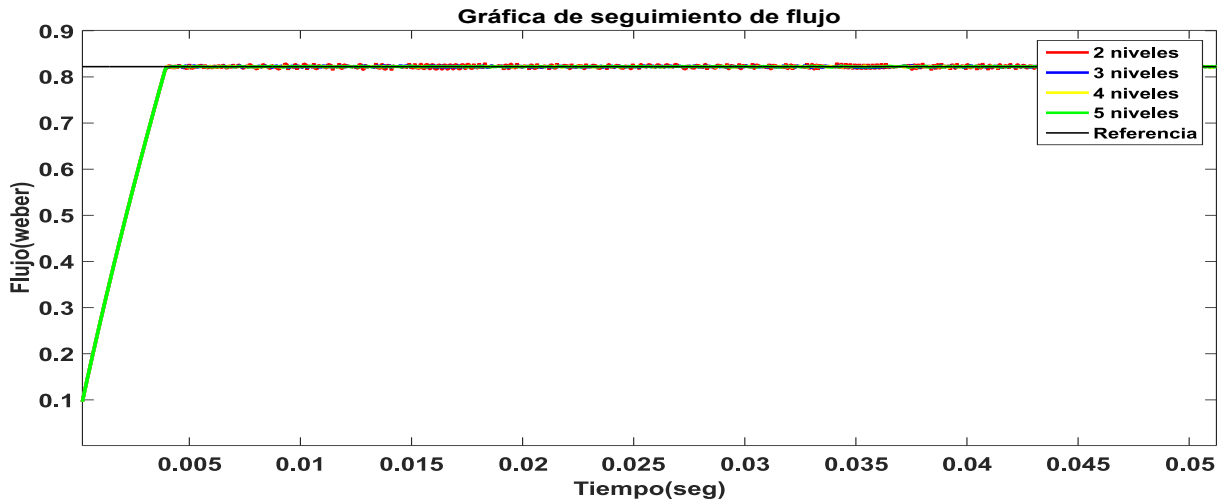
Figura 3.21: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 2.

En la figura 3.21 se muestra el comportamiento del flujo del estator pero con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Se observa que la disminución del tiempo de muestreo no afecta al transitorio ya que ambas simulaciones de esta misma prueba llegan a la referencia de flujo en un tiempo de $0.004s$, sin embargo se logra apreciar que disminuyendo el tiempo de muestreo el error del flujo disminuye. Se observa que a pesar de los cambios de velocidad y de par, el flujo se mantiene en su

referencia en todo el tiempo de simulación.



(a) Seguimiento de flujo para diferentes niveles de tensión.



(b) Detalle en el cambio de escalón.

Figura 3.22: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 2.

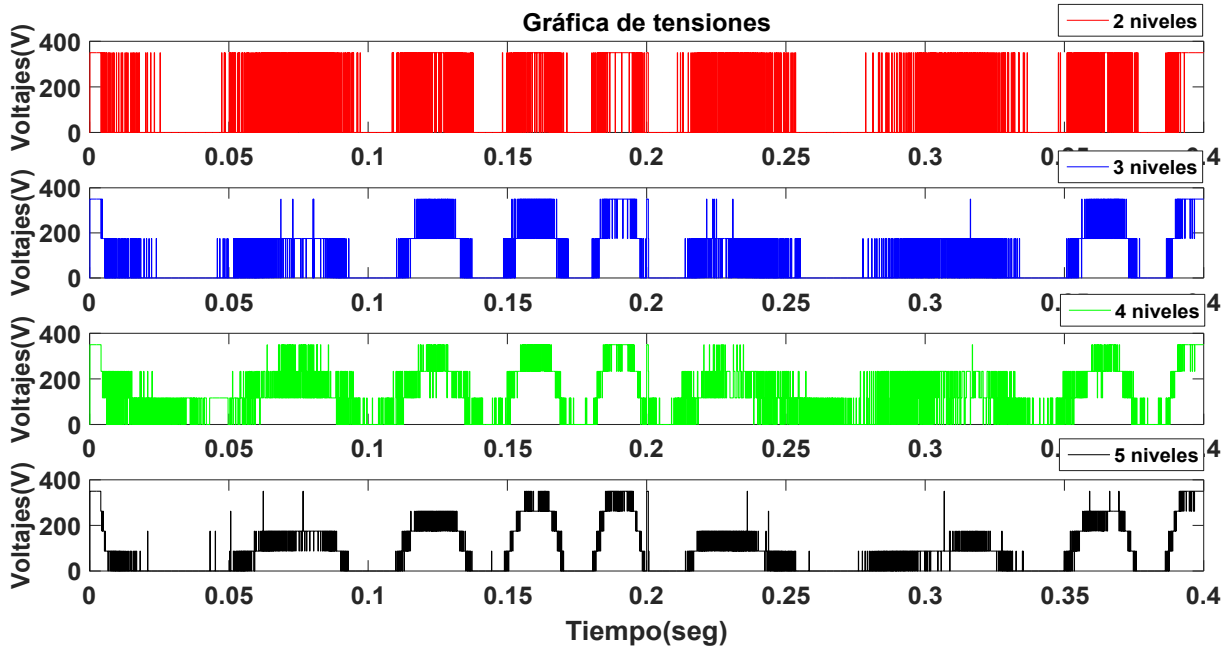
En la tabla 3.7 se presentan los resultados de los errores RMS promedio del flujo para diferentes niveles de tensión y sus porcentajes de reducción tomando como base el sistema alimentado por el inversor de 2 niveles. Se concluye que al aumentar los niveles de tensión que puede aportar el inversor el error disminuye hasta un 73%. Además, disminuyendo el tiempo de muestreo el error puede reducirse un 50 % para todos los niveles de tensión. Por otra parte, el cambio en el signo del par y de la velocidad no afectan el desempeño en cuanto a las variables controladas.

Resultados				
Convertidor	Tiempo de muestreo = $100\mu s$		Tiempo de muestreo = $50\mu s$	
	Error RMS del flujo	%Reducción	Error RMS del flujo	%Reducción
2 niveles	0.0072	Base	0.0035	Base
3 niveles	0.0036	47.05 %	0.0017	51.48 %
4 niveles	0.0023	66.17 %	0.0012	65.71 %
5 niveles	0.0018	73.52 %	0.0008	77.46 %

Tabla 3.7: Error promedio de flujo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 2.

Tensiones en el estator V_s

En las figuras 3.23 y 3.24 se muestran las tensiones que suministra el inversor al estator con diferentes tiempos de muestreo. Se puede apreciar que al invertir el giro del rotor la velocidad comienza a disminuir por lo tanto el controlador demanda al inversor no utilizar niveles de tensión más altos para los casos de 3, 4 y 5 niveles, cuando vuelve el rotor a tomar velocidad se aprecia de nueva cuenta que el controlador demanda al inversor mayores magnitudes de tensión para ambas simulaciones con diferentes tiempos de muestreo.

Figura 3.23: Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 2.

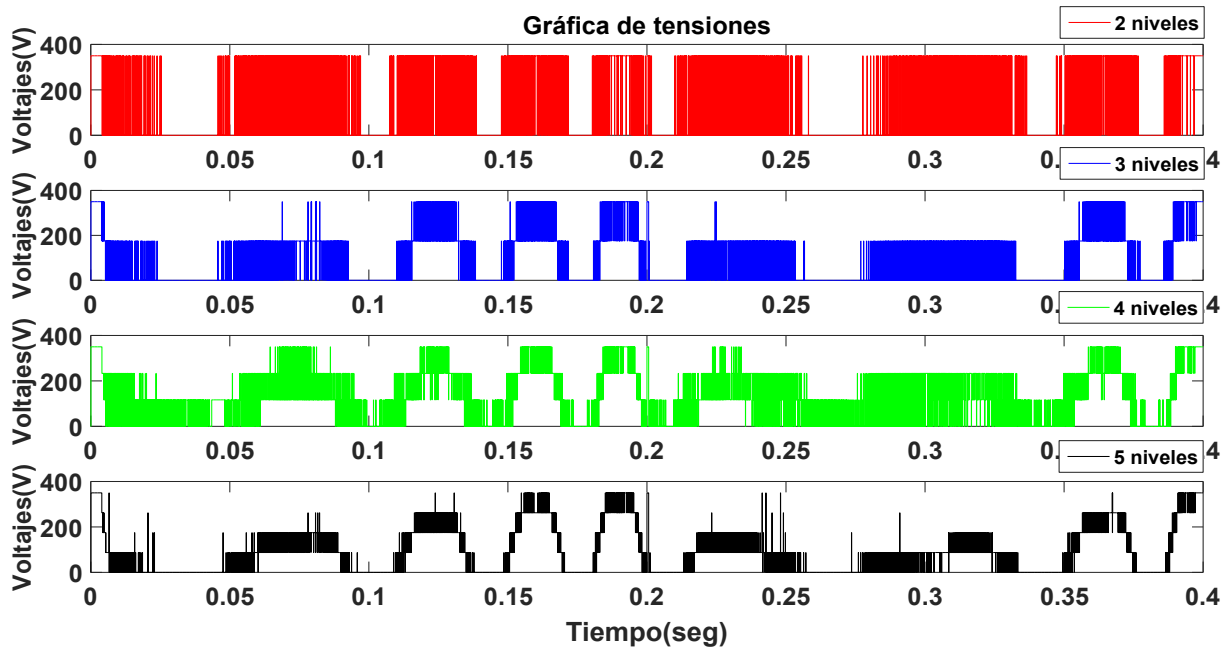


Figura 3.24: Tensiones de la fase *a*, aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 2.

A continuación, en la tabla 3.8 se muestra el total de vectores a evaluar y el incremento en %, los resultados se comparan con los obtenidos con el convertidor de 2 niveles. Es preciso señalar que a medida que aumenta el número de niveles, mayor es el número de vectores a evaluar, obteniendo el máximo incremento de 1462.5 %, al utilizar el convertidor de 5 niveles. Esto no es recomendable ya que al disminuir el tiempo de muestreo menor es el tiempo que tendrá el controlador en realizar operaciones.

Resultados			
Convertidor	Número de vectores a evaluar	Incremento en operaciones	Incremento
2 niveles	8	Base	Base
3 niveles	27	19	237.5 %
4 niveles	64	56	700 %
5 niveles	125	117	1462.5 %

Tabla 3.8: Total de vectores a evaluar y el incremento en % con respecto al caso base de 2N - Prueba 2.

En la tabla 3.9 se muestran el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más

de un nivel de tensión. Los resultados muestran que a mayor número de niveles de tensión que puede entregar el inversor menor es el número de conmutaciones por fase, sin embargo, a mayor número de niveles de tensión que puede entregar el inversor aumenta el número de saltos en más de un nivel de tensión.

Resultados												
Convertidor	Tiempo de muestreo de $=T_s = 100$						Tiempo de muestreo de $=T_s = 50$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
2 Niveles	1427	1460	1500	na	na	na	2885	2896	2987	na	na	na
3 Niveles	1443	1487	1478	21	11	21	2856	2909	2671	28	21	20
4 Niveles	1402	1450	1425	33	37	27	2795	2800	2775	50	47	44
5 Niveles	1337	1335	1335	54	53	40	2706	2656	2737	82	89	87

Tabla 3.9: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 2.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 3.25-3.28, se muestran las corrientes de fase del estator con un $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde, se observa que al aumentar la velocidad angular de la máquina hace que la frecuencia de la corriente del estator aumente, también se muestra que al cambio de signo del par en $t = 0.2s$ y al cambiar el signo de giro en $t = 0.3s$ las fases en el estator cambian de secuencia colocando primero la fase *c* después la fase *b* y al último la fase *a*.

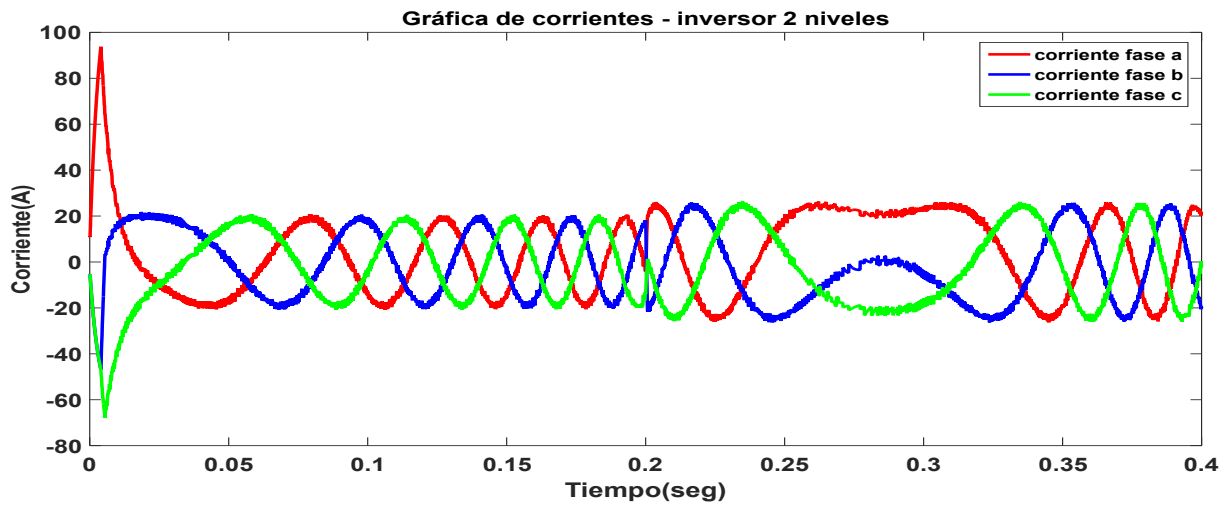


Figura 3.25: Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

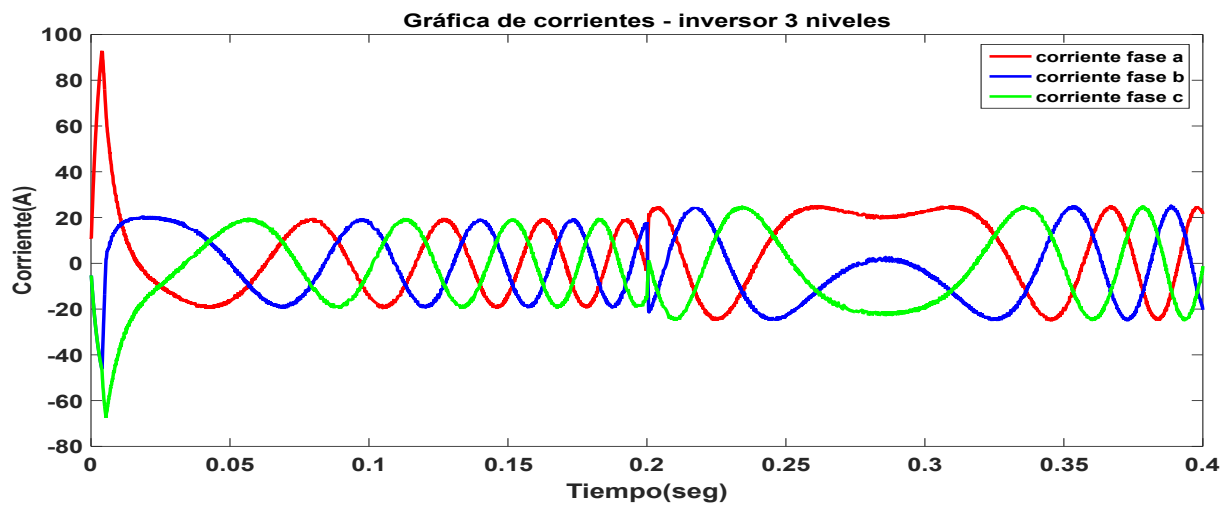


Figura 3.26: Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

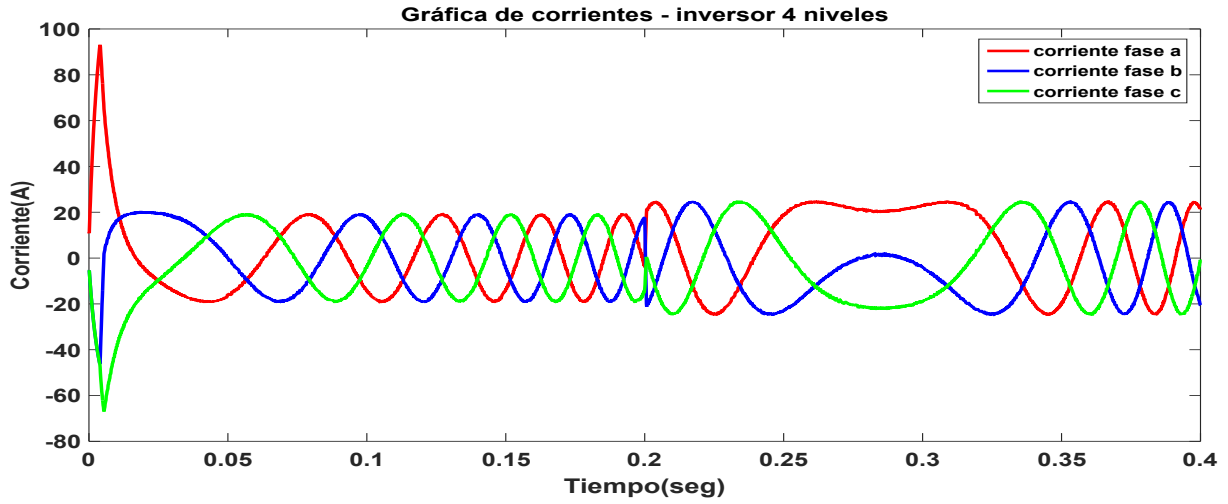


Figura 3.27: Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

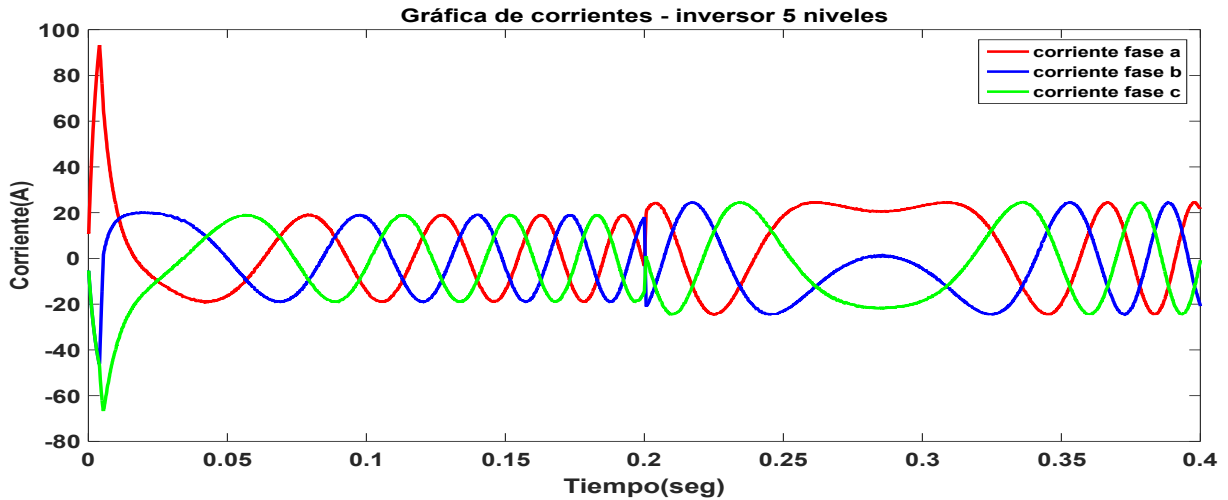


Figura 3.28: Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

En las figuras 3.29-3.32, se muestran las corrientes de fase del estator con un $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde, se observa que al aumentar la velocidad angular de la máquina hace que la frecuencia de la corriente del estator aumente, también se muestra que al cambio de signo de par en $t = 0.2s$ y al cambiar el signo de giro en $t = 0.3s$ las fases en el estator cambian de secuencia colocando primero la fase *c* después la fase *b* y al último la fase *a*. También se aprecia que al

disminuir el tiempo de muestreo el rizo en la corriente disminuye.

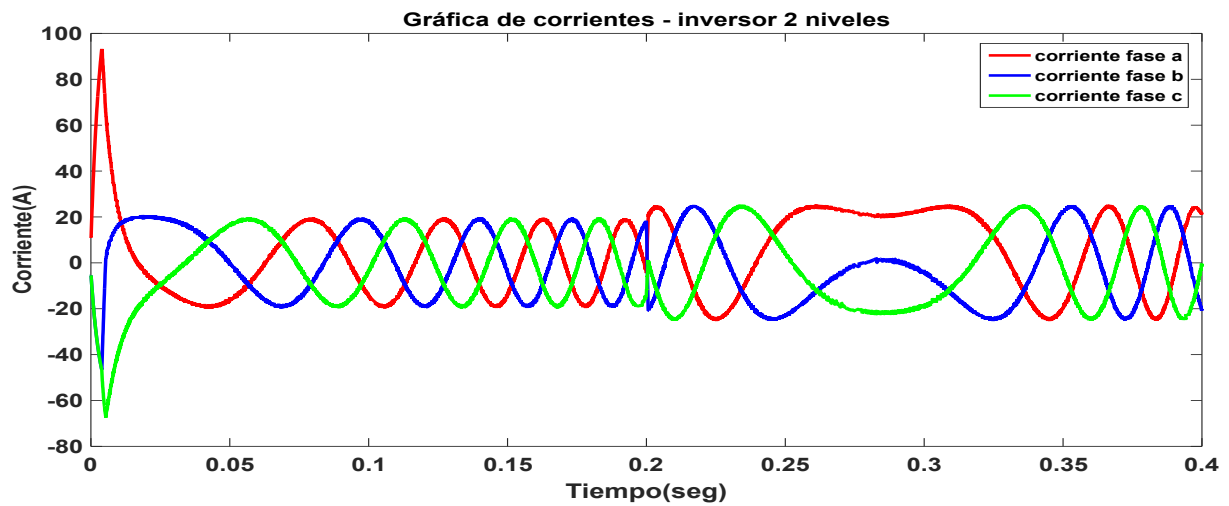


Figura 3.29: Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

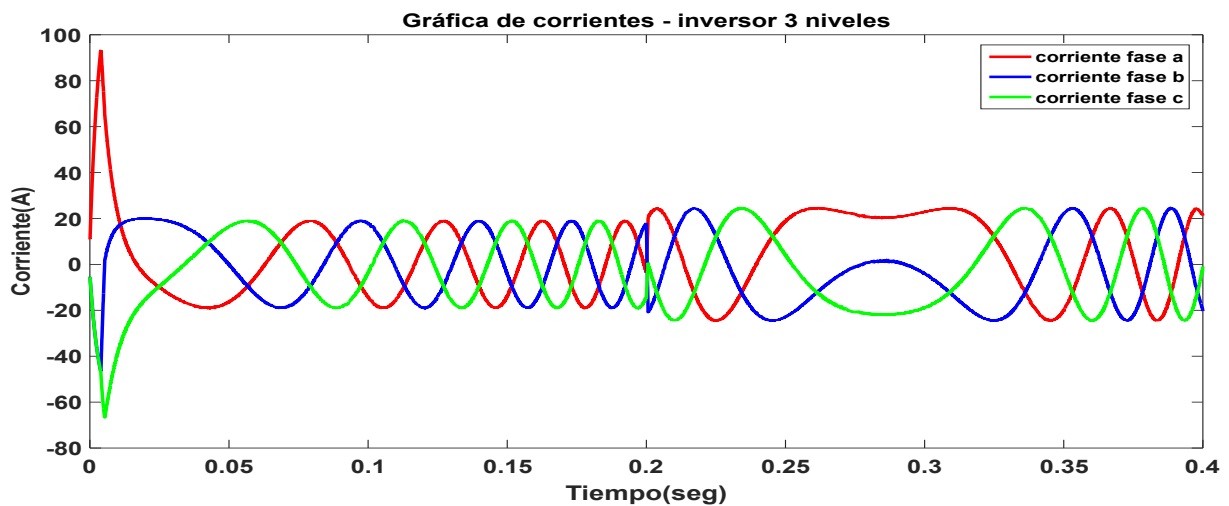


Figura 3.30: Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

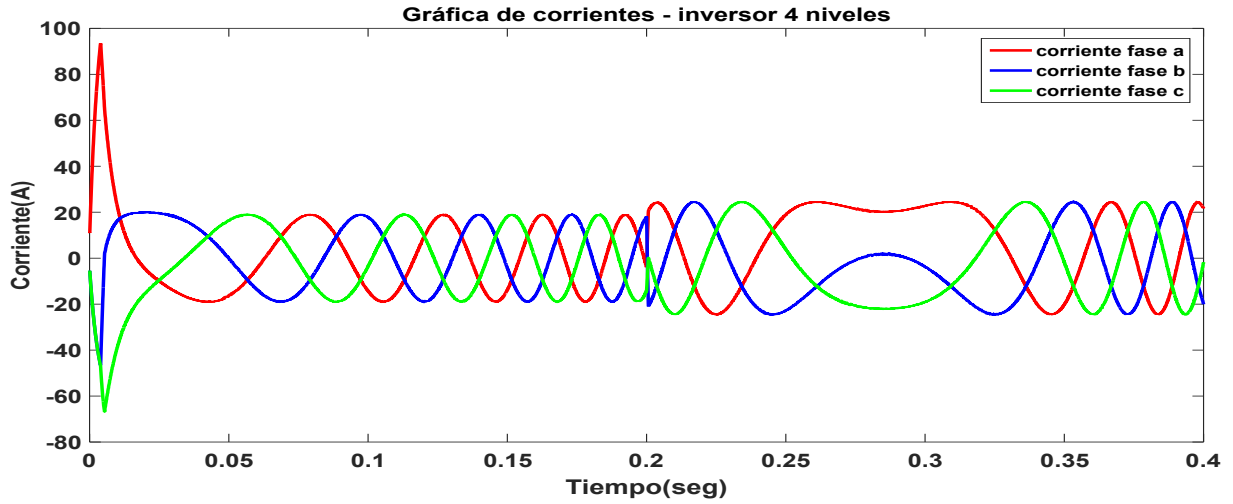


Figura 3.31: Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

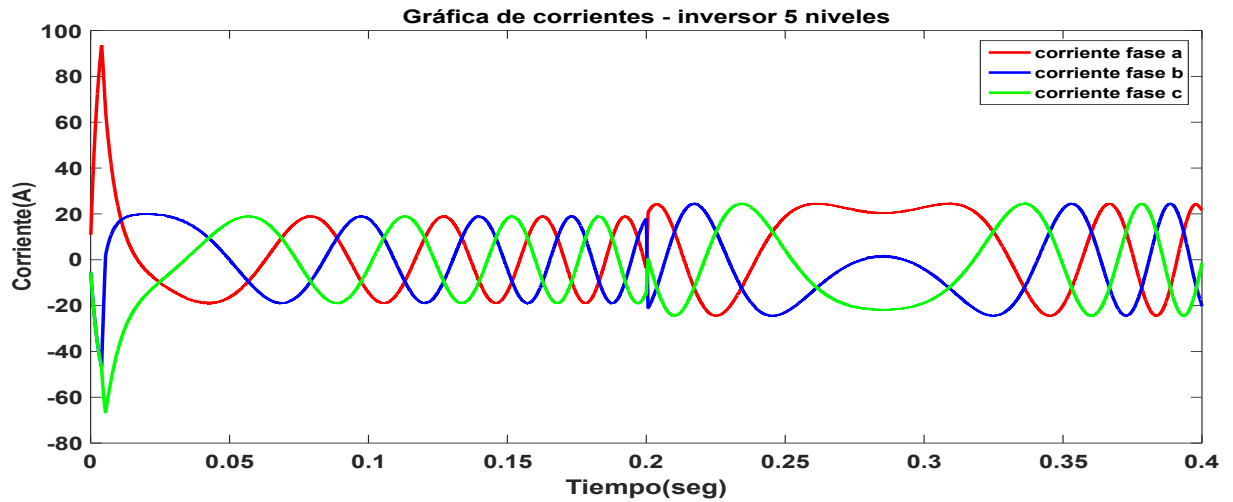


Figura 3.32: Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

En la tabla 3.10 se presenta el valor del rizo máximo en las corrientes del estator, los resultados se comparan con los obtenidos por el convertidor de 2 niveles. Los resultados indican que al aumentar los niveles de tensión que aporta el inversor se logra reducir el rizo de la corriente hasta un 65% tomando como base el inversor de 2 niveles. También otra forma en la que se puede reducir aún más el valor del rizo es disminuyendo el tiempo de muestreo.

Resultados				
Convertidor	Tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$		Tiempo de muestreo $T_s = 50\mu s$	
	Valor del rizo máximo	Reducción	Valor del rizo máximo	Reducción
2 niveles	3.89 A	Base	2.02 A	Base
3 niveles	2.51 A	35.47 %	1.35 A	33.16 %
4 niveles	1.77 A	54.26 %	0.85 A	57.92 %
5 niveles	1.41 A	63.75 %	0.70 A	65.00 %

Tabla 3.10: Valor del rizo máximo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 2.

3.3.3. Prueba 3.- Tren de Velocidad

En esta prueba, las estrategias de control FCS-MPC serán evaluadas junto con un lazo de control de velocidad de tipo PI, donde la velocidad de referencia será cambiada de forma escalonada. Se demanda una secuencia de velocidad de 100 - 400 - 1000 - -1000 RPM, con un intervalo de 0 - 0.5 - 1 - 1.5 s entre cada cambio de magnitud, con una referencia de flujo de 0.8 webers, el tiempo de simulación será de 2.5 segundos. Las pruebas se realizaron con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. La constante proporcional e integral son $K_p = 5$ y $K_i = 1$; la sintonización fue realizada heurísticamente. El sistema posee un par de carga de $T_L = 11.9N - m$. En la figura 3.33 se muestra el diagrama de control aplicando un control de velocidad de tipo PI junto con metodología FSC-MPC a un motor de inducción alimentado por inversores multinivel.

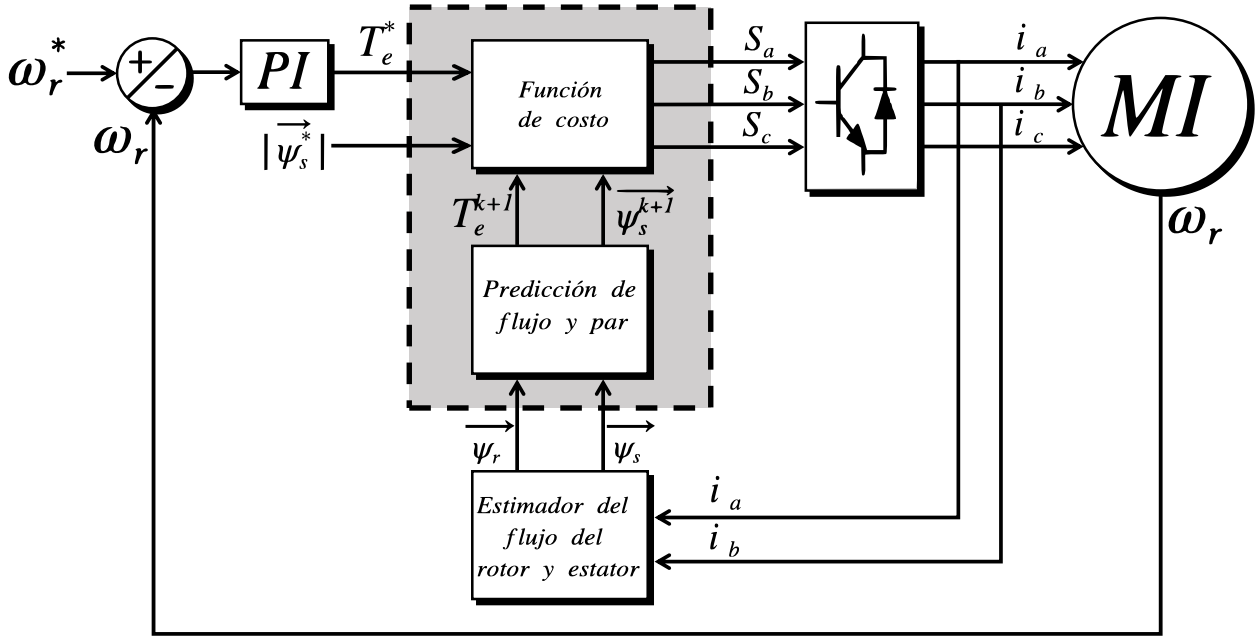


Figura 3.33: Diagrama de control aplicando una metodología FSC-MPC junto con un lazo control de velocidad de tipo PI a un motor de inducción alimentado por inversores multinivel.

Velocidad angular ω_r - Par T_e

A continuación, se muestran los resultados correspondientes al seguimiento de velocidad, con inversores de diferentes niveles de tensión. Los resultados para un inversor de dos niveles se muestran en color rojo, para tres niveles en color azul, para cuatro niveles en amarillo y en verde para cinco niveles. La referencia se da en el trazo de color negro.

En la figura 3.34 se observa un correcto seguimiento entre la referencia de velocidad ω_r^* y la velocidad medida ω_r . Se puede apreciar que independientemente de los niveles de tensión que pueda aportar el inversor el comportamiento en la velocidad es el mismo.

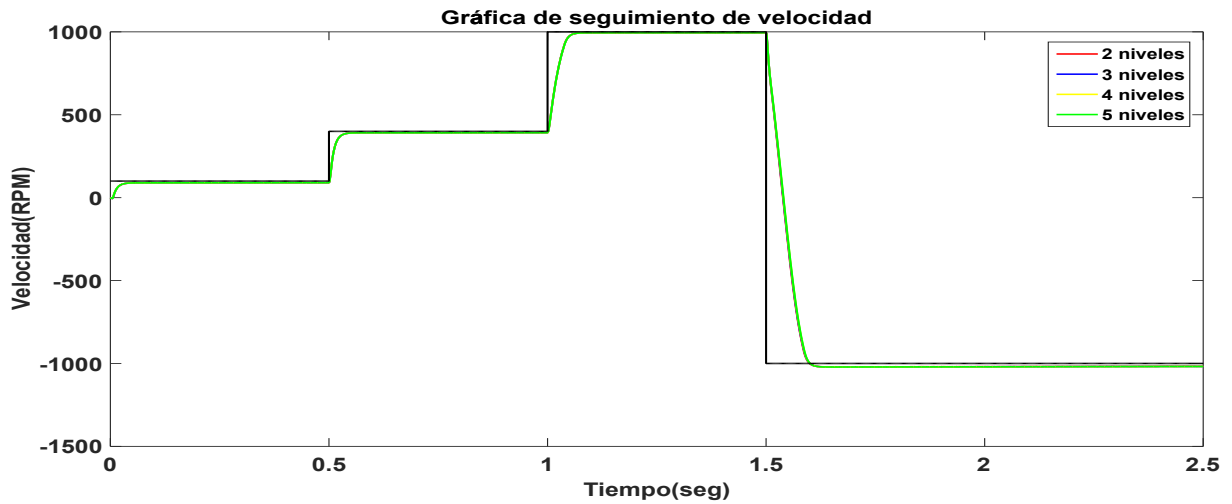


Figura 3.34: Seguimiento de velocidad angular aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 3.

En la figura 3.35 se muestra el comportamiento del par realizando un seguimiento de velocidad con un control FSC-MPC para una máquina de inducción alimentada con diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$. Se muestra que al demandar cambios de escalón en la referencia de velocidad la magnitud del par aumenta, también se aprecia que al demandar una velocidad negativa el control demanda un par negativo por un lapso tiempo hasta que la velocidad llega a su referencia.

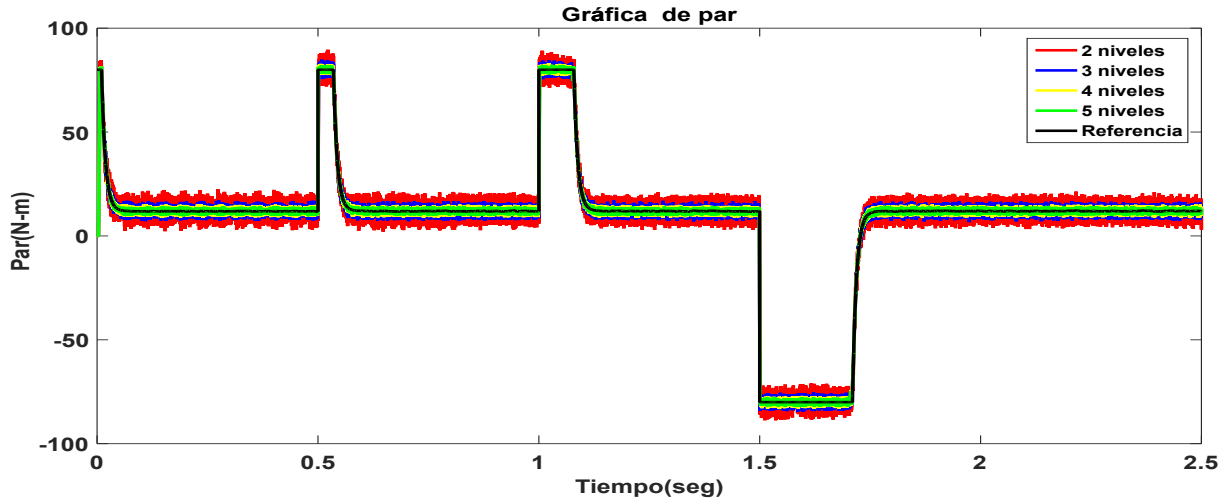


Figura 3.35: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ - Prueba 3.

En la figura 3.36 se muestra el comportamiento del par aplicando un seguimiento de velocidad con un control FSC-MPC para una máquina de inducción alimentada con diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$. Se muestra que el transitorio del par no tiene mayor cambio respecto a la simulación anterior empleando un $T_s = 100\mu s$. Sin embargo, un cambio que se puede apreciar es que al disminuir el tiempo de muestreo el error entre la referencia del par T_e^* y el par medido T_e disminuye.

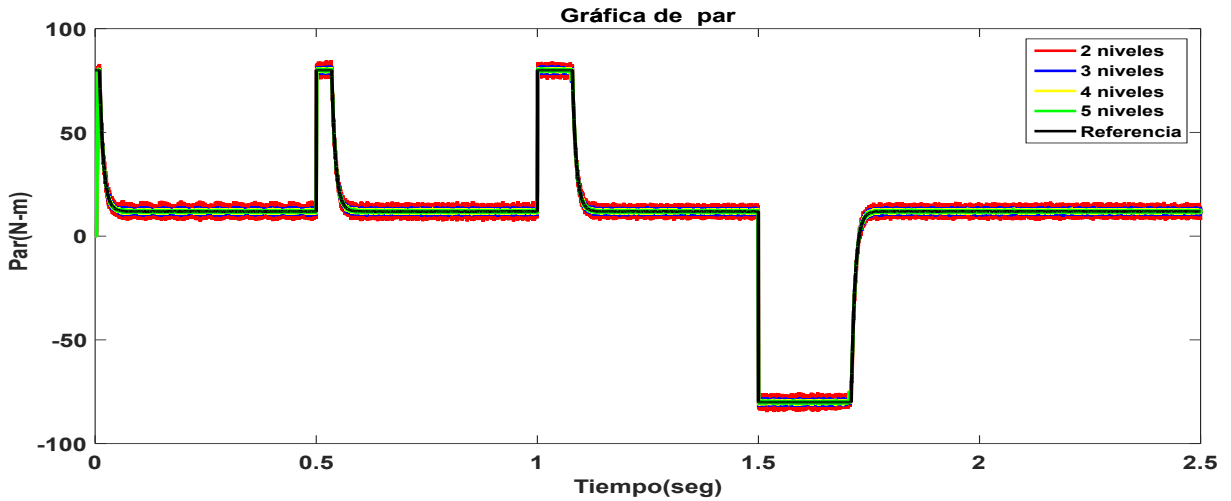


Figura 3.36: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $50\mu s$ - Prueba 3.

En la Tabla 3.11 se muestran los resultados de los errores RMS promedio del par para diferentes niveles de tensión y sus porcentajes de reducción tomando como base el sistema alimentado por el inversor de 2 niveles. Se observa que a medida que aumenta el número de niveles de tensión, el valor RMS del error del par disminuye, obteniendo la máxima reducción de 73 % al utilizar el convertidor de 5 niveles. También se aprecia que al reducir el tiempo de muestreo se logra disminuir un 50 % más el error RMS del par.

Resultados				
Convertidor	Tiempo de muestreo = $100\mu s$		Tiempo de muestreo = $50\mu s$	
	Error RMS del par	%Reducción	Error RMS del par	%Reducción
2 niveles	3.2279	Base	1.6575	Base
3 niveles	1.6803	48.54 %	0.8337	48.54 %
4 niveles	1.1060	65.60 %	0.5558	65.45 %
5 niveles	0.8304	73.69 %	0.4137	73.54 %

Tabla 3.11: Error promedio de par y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 3.

Flujo en el estator ψ_s

En la figura 3.37 se muestra el comportamiento del flujo del estator de la máquina de inducción aplicando un control FSC-MPC alimentada con inversores multinivel con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se observa que la respuesta del sistema es rápida ya que el flujo del estator llega a su referencia en $0.004s$ y a pesar del cambio del giro en el rotor, el flujo se mantiene constante en todo el transcurso de la prueba.

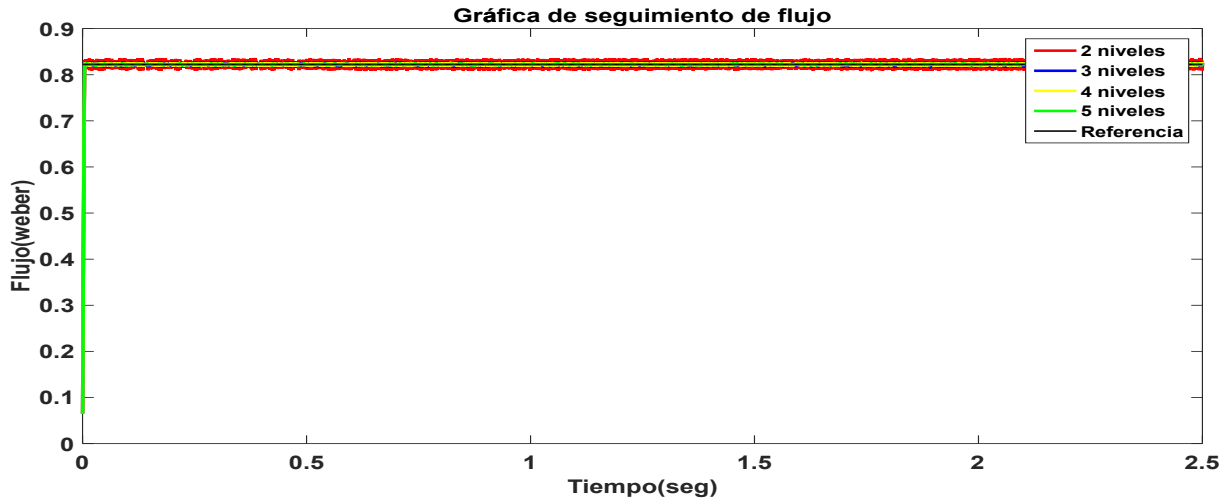


Figura 3.37: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de 100μ - Prueba 3.

En la figura 3.38 se muestra el comportamiento del flujo del estator empleando un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Se observa que la disminución del tiempo de muestreo no afecta al transitorio ya que ambas simulaciones de esta misma prueba llegan a la referencia de flujo en un tiempo de $0.004s$, sin embargo se logra apreciar que disminuyendo el tiempo de muestreo el error del flujo disminuye. Se observa que a pesar de los cambios de velocidad y del par, el flujo se mantiene en su referencia durante toda la prueba.

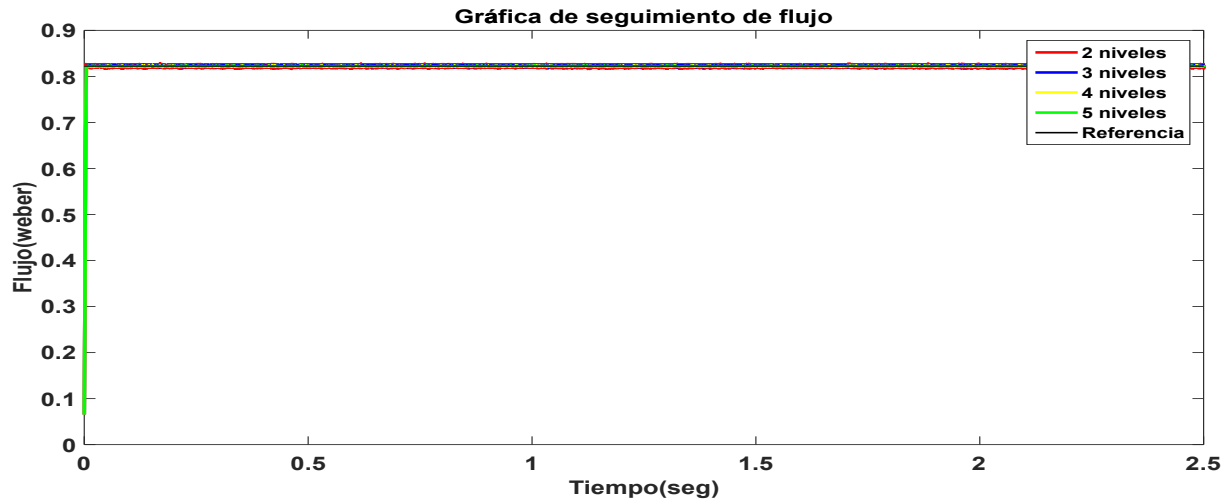


Figura 3.38: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

A continuación, en la tabla 3.12 se muestran los resultados de los errores RMS promedio del flujo para diferentes niveles de tensión y sus porcentajes de reducción tomando como base el sistema alimentado por el inversor de 2 niveles. Es preciso señalar que a medida que aumenta el número de niveles, el valor RMS del error entre la referencia y el flujo disminuye, obteniendo la máxima reducción de 76 %, al utilizar el convertidor de 5 niveles, pero cabe mencionar que el error es pequeño para un inversor de 2 niveles. Al mismo tiempo se observa que se puede disminuir aún más el error disminuyendo el tiempo de muestreo a $T_s = 50\mu s$.

Resultados				
Convertidor	Tiempo de muestreo = $100\mu s$		Tiempo de muestreo = $50\mu s$	
	Error RMS del flujo	%Reducción	Error RMS del flujo	%Reducción
2 niveles	0.0073	Base	0.0035	Base
3 niveles	0.0034	52.38 %	0.0018	51.61 %
4 niveles	0.0023	68.25 %	0.0012	70.96 %
5 niveles	0.0018	76.19 %	0.0008	77.41 %

Tabla 3.12: Error promedio de flujo y % de reducción con respecto al caso base de 2N - Prueba 3.

Tensiones en el estator V_s

En las figuras 3.39 y 3.40 se muestran las tensiones que suministra el inversor al estator con diferentes tiempos de muestreo. Se puede apreciar que al invertir el giro del rotor la velocidad comienza a disminuir por lo tanto el controlador demanda al inversor no utilizar niveles de tensión más altos para los casos de 3, 4 y 5 niveles, cuando vuelve el rotor a tomar velocidad se aprecia de nueva cuenta que el controlador demanda al inversor mayores magnitudes de tensión para ambas simulaciones con diferentes tiempos de muestreo.

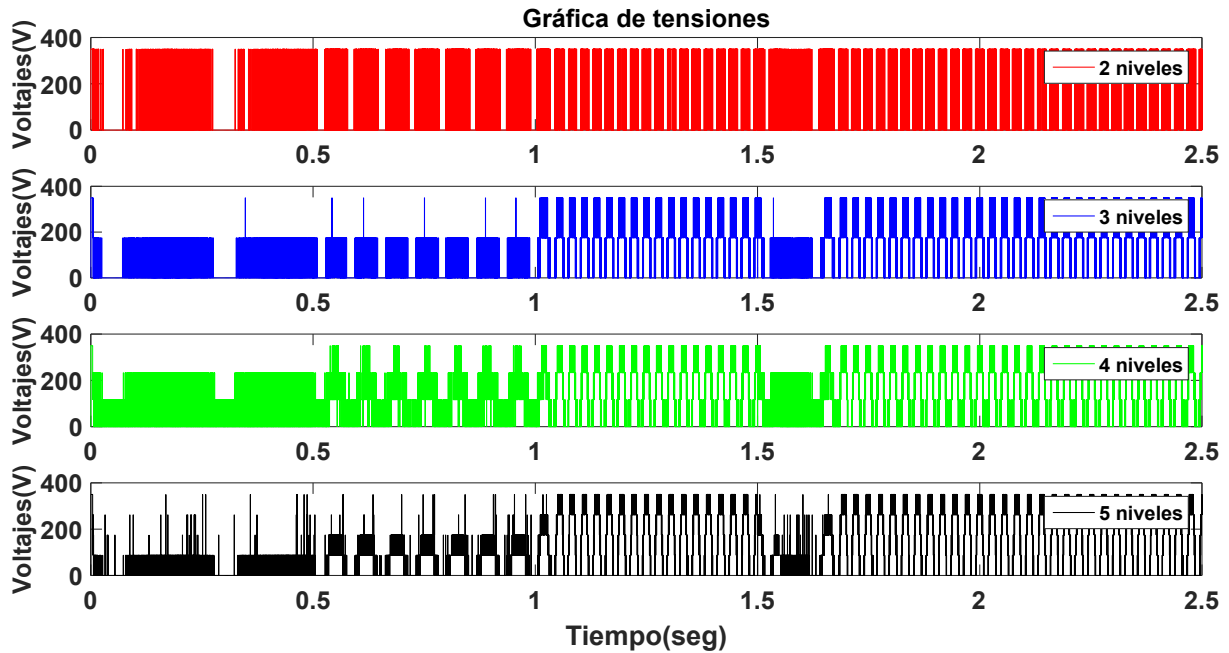


Figura 3.39: Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.

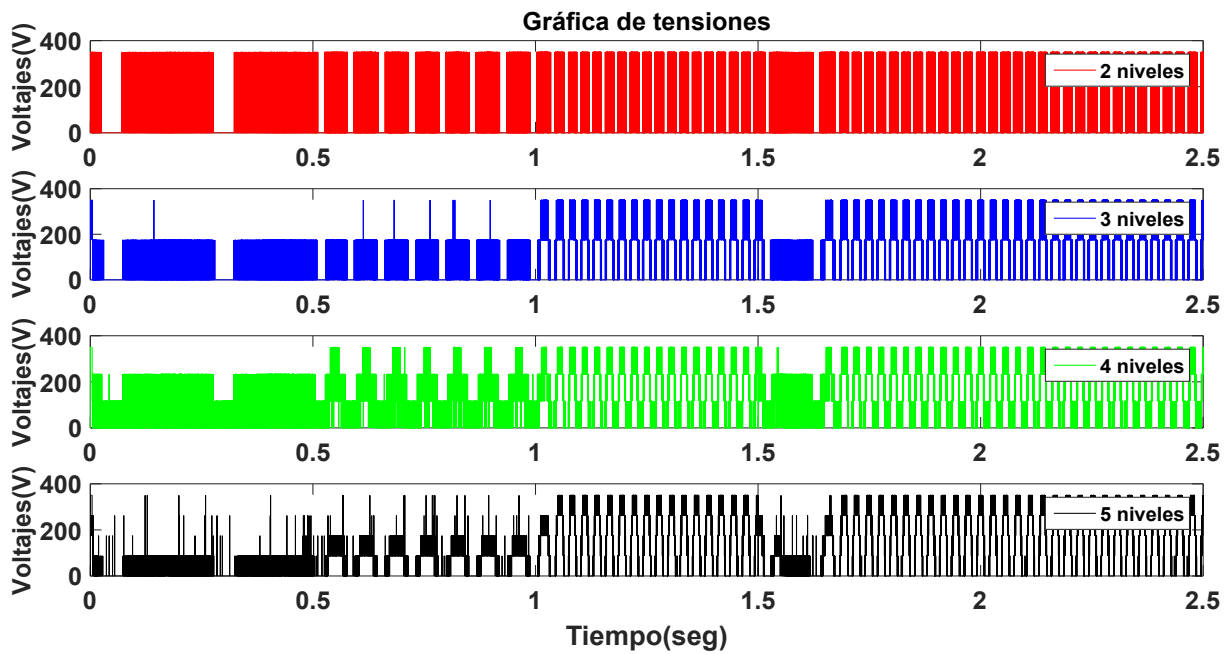


Figura 3.40: Tensiones de la fase a , aplicando FCS-MPC para diferentes niveles de tensión con un $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

A continuación, en la tabla 3.13 se muestra el total de vectores a evaluar y el incremento en

%, los resultados se comparan con los obtenidos con el convertidor de 2 niveles. Es preciso señalar que a medida que aumenta el número de niveles, mayor es el número de vectores a evaluar, obteniendo el máximo incremento de 1462.5 %, al utilizar el convertidor de 5 niveles. Esto no es recomendable ya que al disminuir el tiempo de muestreo menor es el tiempo que tendrá el controlador en realizar operaciones.

Resultados			
Convertidor	Número de vectores a evaluar	Incremento en operaciones	Incremento
2 niveles	8	Base	Base
3 niveles	27	19	237.5 %
4 niveles	64	56	700 %
5 niveles	125	117	1462.5 %

Tabla 3.13: Total de vectores a evaluar y el incremento en % con respecto al caso base de 2N - Prueba 3.

En la tabla 3.14 se muestran el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión. Para esta prueba de control de velocidad a diferencia de las pruebas 1 y 2 los resultados muestran que a mayor número de niveles de tensión que puede entregar el inversor mayor es el número de conmutaciones y también, aumenta el número de saltos en más de un nivel de tensión.

Resultados												
Convertidor	Tiempo de muestreo de $=T_s = 100$						Tiempo de muestreo de $=T_s = 50$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
2 Niveles	7494	7484	7568	na	na	na	13538	13567	13681	na	na	na
3 Niveles	8807	8682	8626	23	24	26	16929	16878	16891	33	60	61
4 Niveles	10503	10088	10020	210	222	205	17550	18202	17995	320	351	337
5 Niveles	11029	10735	10928	415	436	421	19284	19218	19525	643	661	621

Tabla 3.14: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 3.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 3.41-3.44, se muestran las corrientes de fase del estator con un $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para

la fase c en color verde, se observa que al aumentar la velocidad angular de la máquina hace que la frecuencia de las corrientes del estator aumente. También se observa que al demandar un cambio en la referencia de velocidad las corrientes entran en un transitorio hasta que la velocidad converge a su referencia, además se observa que al aumentar la velocidad angular de la máquina hace que la frecuencia de la corriente del estator aumente, también se muestra que al cambio de signo de velocidad en $t = 1.5s$ las fases en el estator cambian de secuencia colocando primero la fase c después la fase b y al último la fase a .

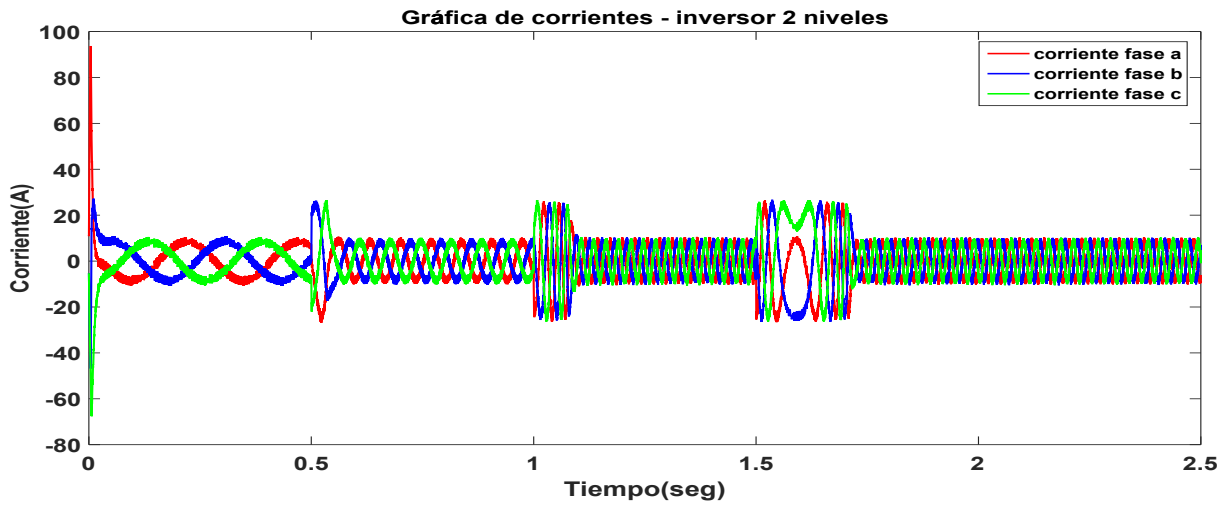


Figura 3.41: Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.

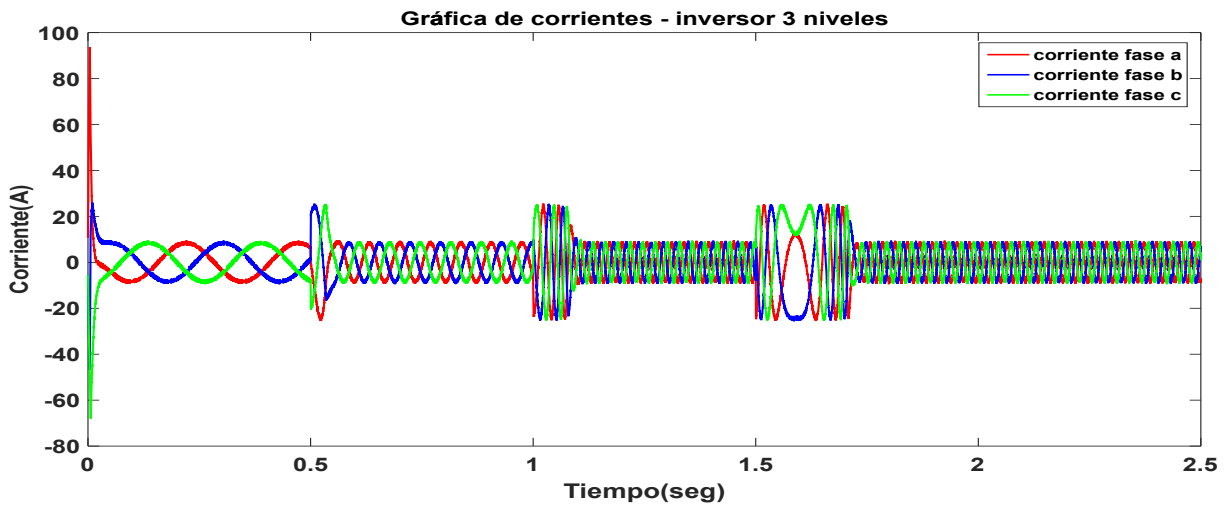


Figura 3.42: Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.

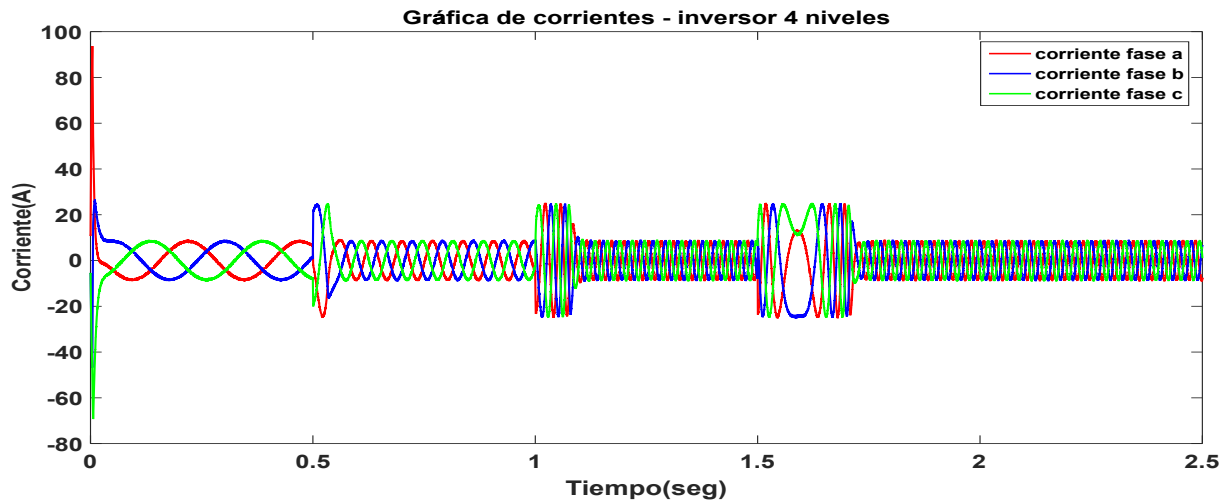


Figura 3.43: Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.

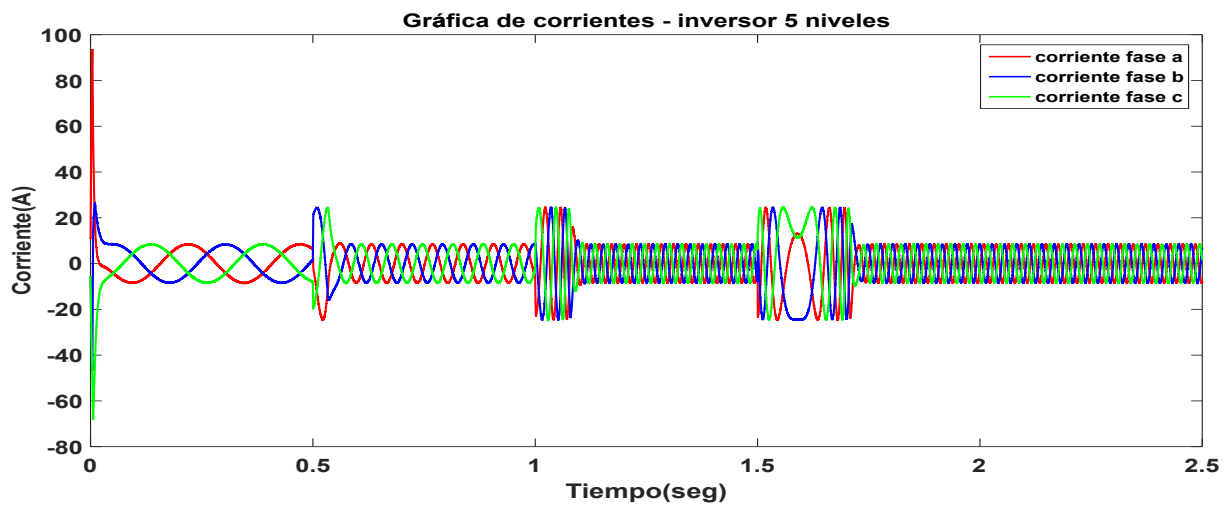


Figura 3.44: Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.

En las figuras 3.45-3.48, se muestran las corrientes de fase del estator con un $T_s = 50\mu s$. Se aprecia que al disminuir el tiempo de muestreo a $T_s = 50\mu s$ no afecta en el transitorio del sistema ya que ambas simulaciones presentan el mismo comportamiento, sin embargo, se logra apreciar que el disminuir el tiempo de muestreo la distorsión en las corrientes disminuye.

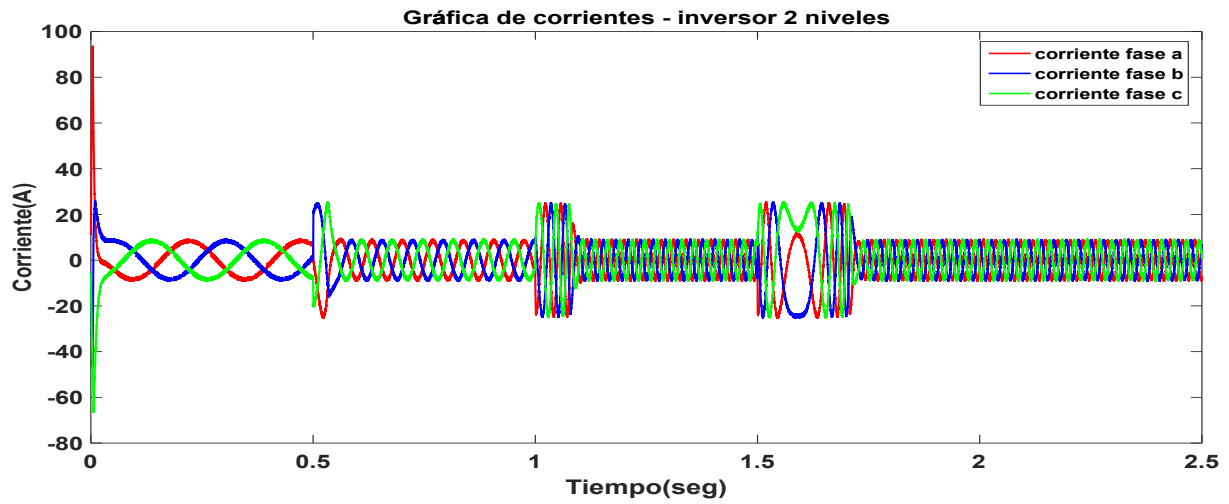


Figura 3.45: Corrientes de fase de un convertidor de 2 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

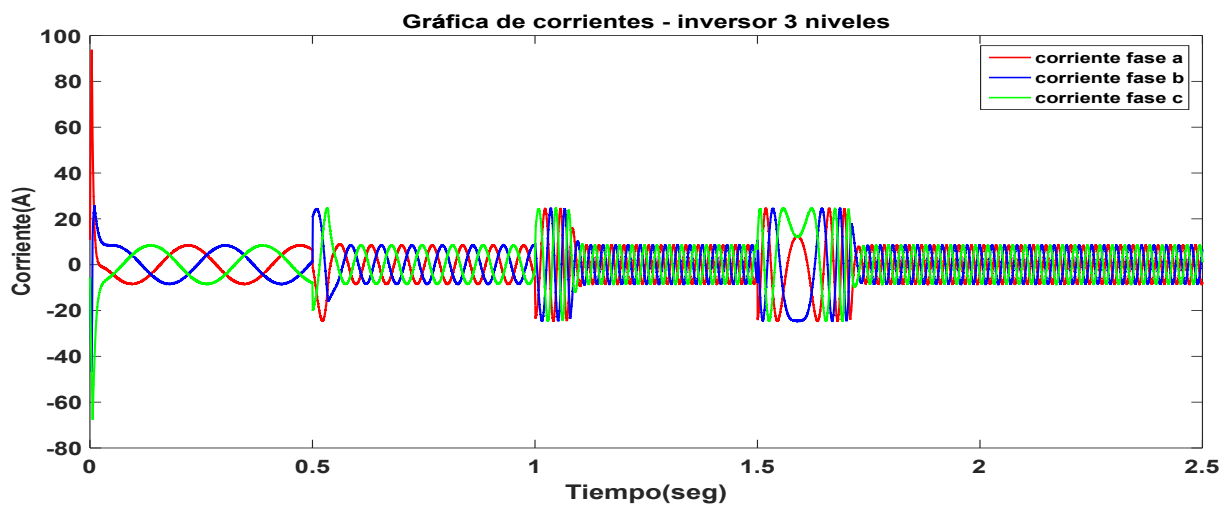


Figura 3.46: Corrientes de fase de un convertidor de 3 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

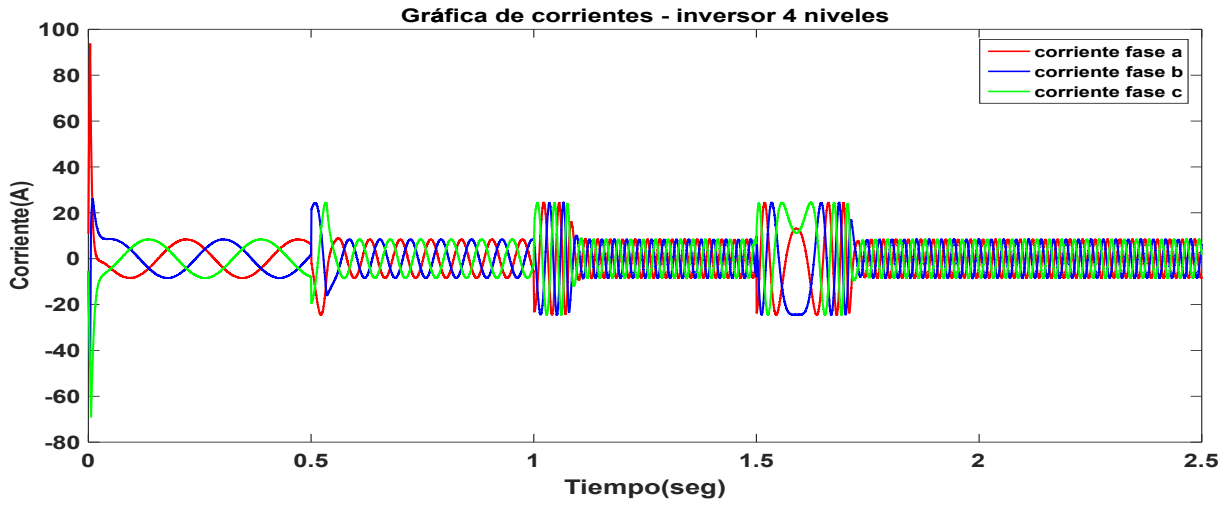


Figura 3.47: Corrientes de fase de un convertidor de 4 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

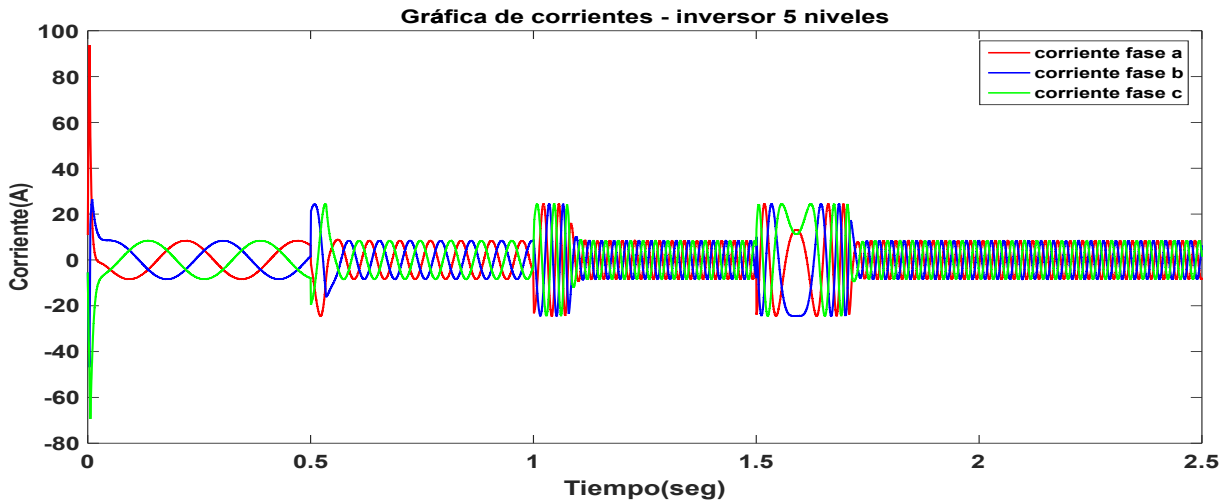


Figura 3.48: Corrientes de fase de un convertidor de 5 niveles, aplicando FCS-MPC con $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

En la tabla 3.15 se muestran los valores de la distorsión armónica con base en su frecuencia fundamental y el rizo máximo de las corrientes del estator para tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se observa que al aumentar los niveles de tensión que aporta el inversor reduce la distorsión armónica hasta un 12% tomando como base el inversor de 2 niveles. Los resultados muestran que al aumentar los niveles de tensión se disminuye el valor del rizo en las corrientes. También otra forma en la que se puede reducir aún más la distorsión y el valor del rizo es dismi-

nuyendo el tiempo de muestreo.

Resultados												
Convertidor	Tiempo de muestreo = 100μs						Tiempo de muestreo = 50μs					
	t = 0.05 – 0.5		t = 0.6 – 0.1		t = 2 – 2.5		t = 0.1 – 0.5		t = 0.6 – 0.1		t = 2 – 2.5	
	Ff = 4Hz		Ff = 15 Hz		Ff = 35 hz		Ff = 4Hz		Ff = 15Hz		Ff = 35Hz	
	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo
2 niveles	18.11	3.98 A	18.55	3.85 A	18.7	3.98 A	9.08	2.00 A	10	1.93 A	9.56	2.07 A
3 niveles	8.99	2.02 A	9.98	1.98 A	9.31	2.22 A	4.6	1.01 A	6.3	0.97 A	5.79	1.08 A
4 niveles	6.3	1.36 A	7.51	1.30 A	7.0	1.55 A	3.2	0.67 A	5.32	0.67 A	4.6	0.85 A
5 niveles	4.5	1.04 A	6.33	1.22 A	5.85	1.30 A	2.4	0.51 A	4.9	0.61 A	4.15	0.66 A

Tabla 3.15: Distorsión armónica y rizo máximo en las corrientes del estator - Prueba 3.

3.4. Conclusiones

De las pruebas que se realizaron en este capítulo se pueden obtener ciertas conclusiones. La primera es que el control FSC-MPC cumple los objetivos propuestos, que son mantener el par, el flujo y el seguimiento de velocidad en una referencia.

Se observa que cuando el flujo del estator llega a una referencia deseada, no sufre ninguna perturbación a pesar de que la referencia del par o velocidad este cambiando en diferentes puntos de operación como se mostró en la prueba 1, 2 y 3.

Otra conclusión es que al aumentar el número de vectores que posee el inversor menor es la variación del error en los estados, reduce la distorsión armónica y el rizo máximo en las corrientes de fase.

También se muestra que al disminuir el tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ a $T_s = 50\mu s$ el error RMS para el par, el flujo y la distorsión en la corriente se reduce un 50% para todos los niveles de tensión que puede aportar el inversor, sin embargo al reducir el tiempo de muestreo menor será el tiempo para poder realizar operaciones lo cual no es favorable tomando en cuenta que a mayor número de niveles de tensión que puede aportar el inversor mayor son el número de operaciones.

Los resultados de las pruebas mostraron que al tener un mayor número de niveles de tensión, será mayor número de vectores a evaluar. Entre un inversor de 2 niveles a uno de 5 niveles, el número de operaciones aumenta en un 1462.5%. En el próximo capítulo se presenta una propuesta para reducir el costo computacional sin afectar los objetivos de control.

Todos los resultados de las pruebas realizadas en este capítulo se tomarán como base para las comparaciones del desempeño de la propuesta del capítulo 4.

Capítulo 4

Estrategias para reducir el costo computacional

4.1. Introducción

Una de las principales restricciones para implementar la metodología de control predictivo es su elevado costo computacional, al aumentar los niveles de tensión que puede aportar el inversor, mayor será el número de vectores a evaluar por la metodología de control FCS-MPC. Es por eso que en este capítulo se desarrollará un método para la reducción de cálculos, eliminando los vectores redundantes y seleccionando un subconjunto de vectores de tensión tomando en cuenta la posición angular en el que se encuentra el vector de flujo del estator. Se realizarán pruebas bajo las mismas condiciones de las pruebas del capítulo 3 para evaluar la eficiencia del método de selección de vectores propuesto. Así mismo, se integrarán factores de peso para poder dar más prioridad a ciertas variables del sistema y obtener conclusiones sobre las ventajas de este grado de libertad adicional.

4.2. Reducción de tiempo de computo

Una restricción importante que surge al implementar un control predictivo basado en modelo con un conjunto finito de entradas FSC-MPC es el alto esfuerzo computacional al tener inversores multinivel, como se demostró en el capítulo 3. En la figura 3.2 se muestra que la metodología de control tiene que evaluar cada uno de los vectores generados por el inversor lo que lleva a un aumento de cálculos, lo cual no es eficiente. Considerando esto, en esta investigación se propone un método para reducir el costo computacional.

4.2.1. Eliminación de estados redundantes

Una primera parte de la estrategia que se desea implementar para la reducción del tiempo de cómputo es la eliminación de estados redundantes. Un estado redundante es un estado alternativo para obtener un mismo vector de tensión usando solo los vectores elementales. La figura 4.1 muestra la representación vectorial de un estado redundante, tomando como base el vector \vec{V}_{s6} mostrado en la figura 4.1(a), este vector está formado por la energización a media tensión de las fases a y b [110], de manera que su estado redundante sería el vector \vec{V}_{s5}^1 [221], ya que es el resultado vectorial al energizar las fases a y b a tensión completa y la fase c a media tensión como se muestra en la figura 4.1(b). Los inversores multinivel cuentan con vectores redundantes, los cuales se pueden despreciar para optimizar la estrategia de conmutación del inversor y reducir la carga computacional.

Inversores		
Niveles	Total de vectores	Vectores redundantes
2	8	1
3	27	8
4	64	27
5	125	64

Tabla 4.1: Total de vectores de tensión y vectores redundantes que puede entregar un inversor multinivel.

¹Los vectores redundantes se muestran en el Anexo A

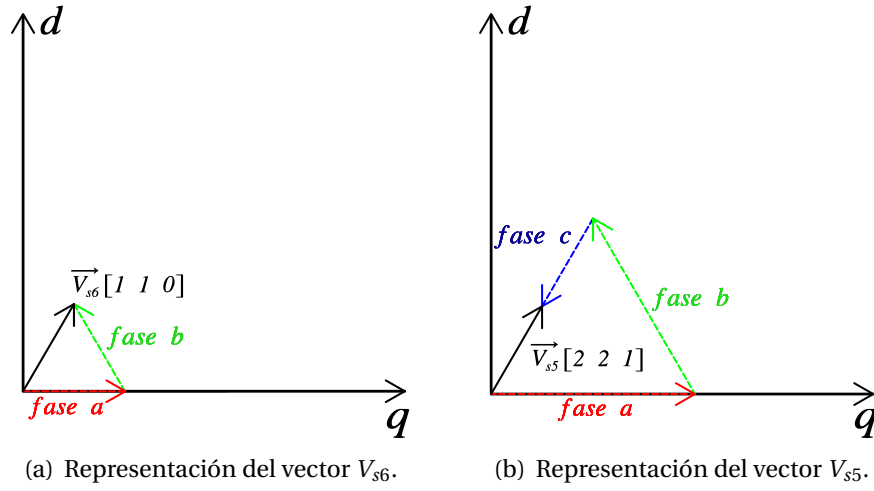


Figura 4.1: Representación vectorial de un estado redundante para un inversor de 3 niveles.

La tabla 4.1 muestra la cantidad de vectores redundantes por niveles que posee un inversor de 2-5 niveles. Se puede definir una ecuación que simplifique obtener la cantidad de vectores redundantes en un inversor trifásico de " n " niveles de tensión, la cual se expresa por:

$$\overrightarrow{V_{red}} = (n - 1)^3 \quad (4.1)$$

Donde $\overrightarrow{V_{red}}$ es la cantidad de vectores redundantes y n es el número de niveles que posee el inversor.

4.2.2. Selección de un subconjunto de vectores

Aunque, al eliminar los vectores redundantes, se reduce el número de cálculos, sigue siendo muy alto y depende del número de niveles de tensión que posea el convertidor, por lo tanto una segunda estrategia que se propone para la reducción de cálculos, es evaluar un subconjunto de vectores del total que posea el inversor tomando en cuenta la posición actual del vector de flujo del estator $\overrightarrow{\psi_s}$. A continuación, se definirá un criterio de como seleccionar el subconjunto adecuado.

Primero, tomando en cuenta la ecuación de par electromagnético que se define como:

$$T_e = K_L |\vec{\psi}_s| |\vec{\psi}_r| \sin \gamma$$

Suponiendo que la magnitud de $\vec{\psi}_s$ y $\vec{\psi}_r$ son constantes, entonces el par es determinado por el ángulo γ entre estos dos vectores. Por otra parte, el flujo del estator $\vec{\psi}_s$, está determinado por el vector de tensión \vec{V}_{si} aplicado al estator, considerando que las pérdidas son despreciables. Por lo tanto, el par y el flujo del motor pueden ser controlados por medio de los vectores de tensión discretos, ya que controlan la magnitud, posición y velocidad del $\vec{\psi}_s$ y en consecuencia el par producido

Tomando la suposición anterior, los vectores de tensión \vec{V}_{si} que pueden guiar al flujo $\vec{\psi}_s$ en su trayectoria circular son aquellos que se encuentran más cercana a la tangente de su posición.

En la figura 4.2 se explica gráficamente la suposición anterior sobre la interacción entre los flujos. Inicia con la aplicación de un vector de tensión \vec{V}_{si} , que genera un vector de flujo $\Delta\vec{\psi}_s$, que al sumarlo con el vector de flujo $\vec{\psi}_s$ ya existente, se obtiene un nuevo vector $\Delta\vec{\psi}_s + \vec{\psi}_s$ en una posición diferente manteniendo una referencia $\vec{\psi}_s^*$, este nuevo vector provoca un cambio en el ángulo γ modificando el par electromagnético, induciendo un cambio al vector de flujo $\vec{\psi}_r$ en la misma dirección .

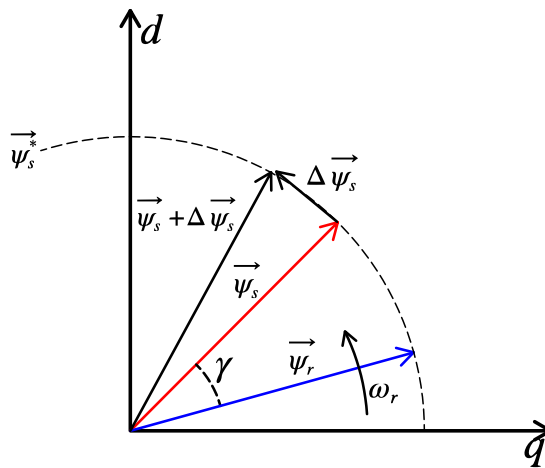


Figura 4.2: Desplazamiento del vector ψ_s por la aplicación de un vector de tensión V_{si} en el estator.

Para verificar que el mejor vector para guiar el flujo en su trayectoria circular, es un vector de tensión perpendicular al vector de flujo, realizaremos una prueba con un inversor de 5 niveles, tomando en cuenta la totalidad de los vectores. Durante la prueba se grabará la información del ángulo del vector seleccionado con respecto al vector de flujo. El objetivo es localizar en qué ángulo se encuentran la mayor cantidad de vectores suministrados. En esta prueba se tomarán los parámetros mostrados en la prueba I del capítulo 3.

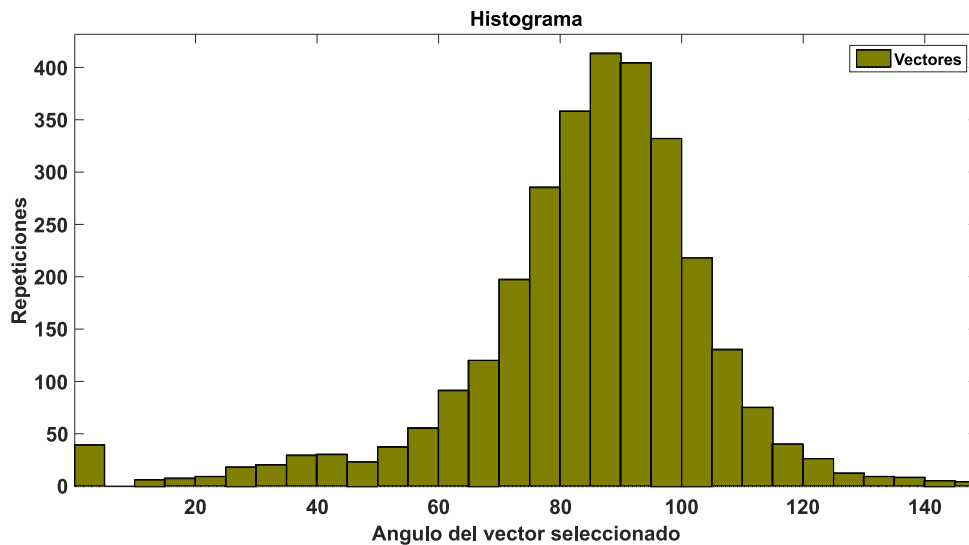


Figura 4.3: Histograma de vectores de tensión aplicados por un inversor de 5 niveles.

En la figura 4.3 se muestra el ángulo del vector de tensión \vec{V}_{si} con respecto al vector de flujo $\vec{\psi}_s$ y la cantidad de veces que fue suministrado por el inversor de 5 niveles. La tabla 4.2 muestra la cantidad de vectores por cada subconjunto, podemos observar que del total de los 3001 vectores aplicados, el 98.06 % de los vectores se encontraban entre el subconjunto de $30^\circ - 150^\circ$, el 67.47 % entre el subconjunto de $60^\circ - 120^\circ$ y el 63.47 % entre el subconjunto de $70^\circ - 110^\circ$.

Subconjunto	Cantidad de vectores aplicados	% del total aplicados
$30^\circ - 150^\circ$	2943	98.06 %
$60^\circ - 120^\circ$	2015	67.47 %
$70^\circ - 110^\circ$	1905	63.47 %

Tabla 4.2: Total de vectores aplicados por cada subconjunto

Por lo tanto tomando en cuenta los resultados mostrados en la tabla 4.2 no es indispensable

evaluar todos los vectores ya que algunos no ayudan a los objetivos de control y solo crean carga computacional, es por esto que definiendo un subconjunto donde se encuentren los vectores mas tangenciales a la posición del vector de flujo, se reducirá la carga computacional sin afectar los objetivos de control, para asignar el subconjunto de vectores a evaluar definimos la siguiente ecuación:

$$\overrightarrow{V_{si}^{opt}} = \left\{ \overrightarrow{V_{si}} (|v_{qd0}|, \forall \theta_i) | \forall \theta_i \in [\theta_{\overrightarrow{\psi_s}} + \theta_1, \theta_{\overrightarrow{\psi_s}} + \theta_2] \right\} \quad (4.2)$$

donde $\overrightarrow{V_{si}^{opt}}$ es el subconjunto de vectores óptimos, θ_1 y θ_2 definen el rango del subconjunto de vectores de tensión y $\theta_{\overrightarrow{\psi_s}}$ es el ángulo del vector del flujo del estator y se define como:

$$\theta_{\psi_s} = \tan^{-1} \left(\frac{\psi_{ds}}{\psi_{qs}} \right) \quad (4.3)$$

donde θ_i es el ángulo del vector de tensión del estator y se define como:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{v_{ds}}{v_{qs}} \right) \quad (4.4)$$

En la figura 4.4 se detalla que el subconjunto de vectores $\overrightarrow{V_{si}^{opt}}$ serán todos aquellos vectores que se encuentren entre θ_1 y θ_2 grados del vector de flujo $\overrightarrow{\psi_s}$.

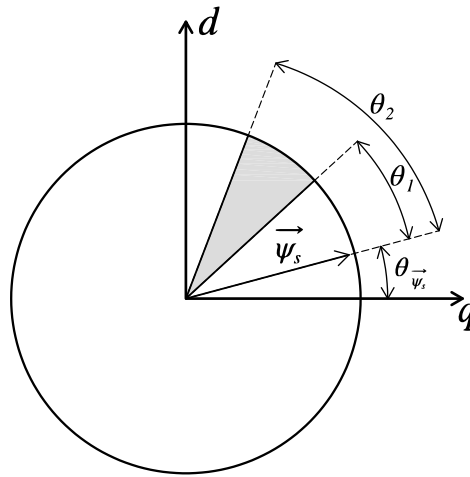


Figura 4.4: Rango para selección de subconjunto de vectores de tensión.

Un objetivo de esta investigación es reducir la carga computacional. En primer lugar, los vectores de tensión redundantes se eliminan eligiendo los vectores de menor nivel de tensión. Luego, se selecciona un subconjunto en un intervalo de θ_1 y θ_2 donde se encuentren los vectores de tensión mas tangenciales considerando la información sobre la posición del vector de flujo $\vec{\psi}_s$, este subconjunto puede definirse con base en los datos mostrados en la figura 4.3 y en la tabla 4.2.

La evaluación de un subconjunto de vectores resultará en un vector que, si no es el óptimo, está en la dirección correcta, y en pasos sucesivos convergerá al vector de voltaje óptimo que minimiza el error de los objetivos de control que en este caso es regular el par y mantener la magnitud del flujo en una referencia. Al final, el uso de un subconjunto de vectores y la eliminación de vectores redundantes, son una solución simple y efectiva para reducir el número de cálculos, sin deteriorar significativamente el desempeño del sistema, como se mostrará en las siguientes secciones.

El nuevo método para seleccionar los vectores aplicando los criterios de reducción de cálculo se detallan en el diagrama de flujo de la figura 4.5; inicia tomando la medición de las corrientes del estator i_{as} e i_{bs} , posteriormente se estiman los flujos del estator y del rotor $\vec{\psi}_s$ e $\vec{\psi}_r$, respectivamente, después tomando en cuenta el flujo del estator $\vec{\psi}_s$ se calcula el ángulo del vector de flujo, tomando en cuenta el ángulo del estator se tomara un subconjunto de vectores de tensión V_{si} que puede entregar el inversor, para después evaluar cada uno de estos, finalmente el vector de tensión (dentro del subconjunto seleccionado) que mejor cubra los objetivos de control es el que será aplicado por el inversor.

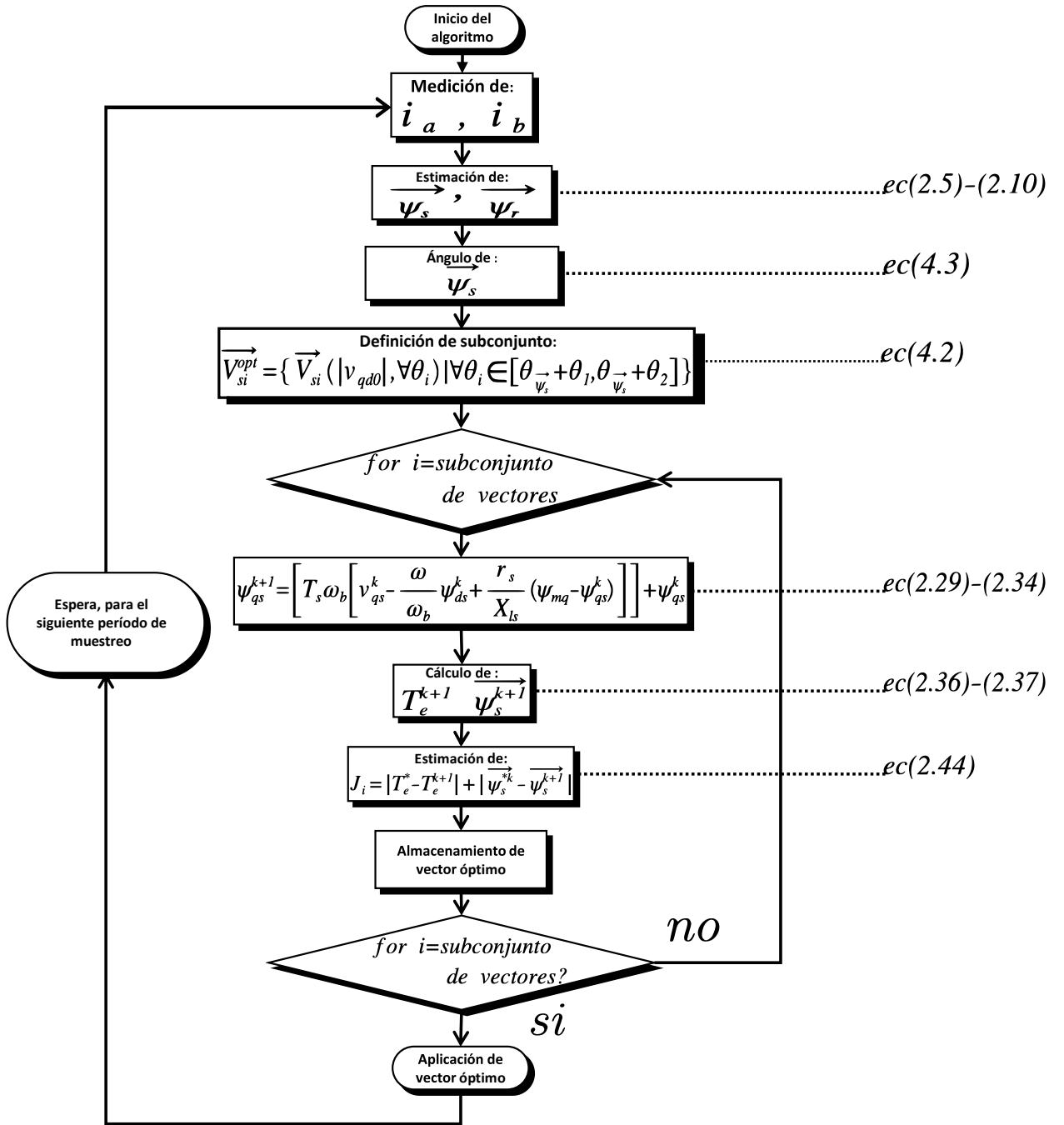


Figura 4.5: Diagrama de flujo aplicando metodología FSC-MPC con reducción computacional.

La diferencia entre la figura 4.5 y 3.2 es que ahora se determina el ángulo $\vec{\psi}_s$ por medio de la ec. (4.3), después se define el subconjunto de vectores que se va a evaluar por medio de la ec. (4.2). Estos dos nuevos pasos definen la estrategia para reducir el costo computacional.

4.3. Pruebas

A continuación, se presentan las pruebas para evaluar el desempeño del método de reducción de cálculos propuesto para control FCS-MPC aplicado a un motor de inducción alimentado por un inversor de 5 niveles; ya que en las pruebas anteriores el sistema presentó un mejor desempeño, sin embargo, con una alta demanda computacional. La tabla 2.1 muestra los parámetros de la máquina.

4.3.1. Prueba 1.-Tren de par implementando reducción computacional sin flujo en estator al inicio

En esta prueba se evalúa la respuesta del control ante un tren de par de referencia. Se demanda una secuencia de par de 50 - 30 - 40 N-m, con un intervalo de 0 - 0.1 - 0.15 segundos entre cada cambio de magnitud y una referencia de flujo de 0.8 webers, el tiempo de simulación será de 0.3 segundos, además se aplicará el algoritmo de reducción computacional tomando diferentes ángulos θ_1 y θ_2 que definen diferentes subconjuntos de vectores. En la tabla 4.3 se encuentran los valores de los ángulos θ_1 y θ_2 y el número de vectores a evaluar, más adelante se realizará una conclusión acerca de la reducción en número de operaciones. Las Pruebas se realizarán con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ $T_s = 50\mu s$.

Subconjunto de vectores	θ_1	θ_2	Número de vectores a evaluar
subconjunto 1	0°	360°	125
subconjunto 2	30°	150°	22
subconjunto 3	60°	120°	16
subconjunto 4	70°	110°	12

Tabla 4.3: Tabla para definición del ángulo y número de vectores a evaluar en cada subconjunto.

Par T_e -Velocidad ω_r

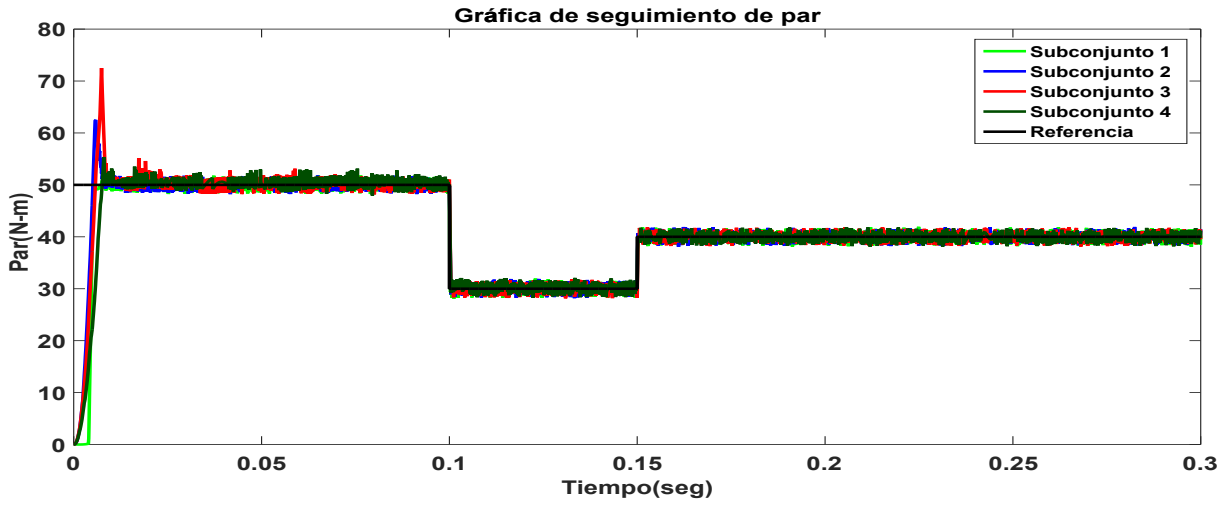
A continuación, se muestran los resultados correspondientes al seguimiento del par de la máquina de inducción aplicando un control FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores. Los resultados para el subconjunto 1 evaluando todos

los vectores se muestran con una traza de color verde claro, para el subconjunto 2 en color azul, para el subconjunto 3 en color rojo y para el subconjunto 4 en color verde oscuro. La referencia se da en el trazo de color negro.

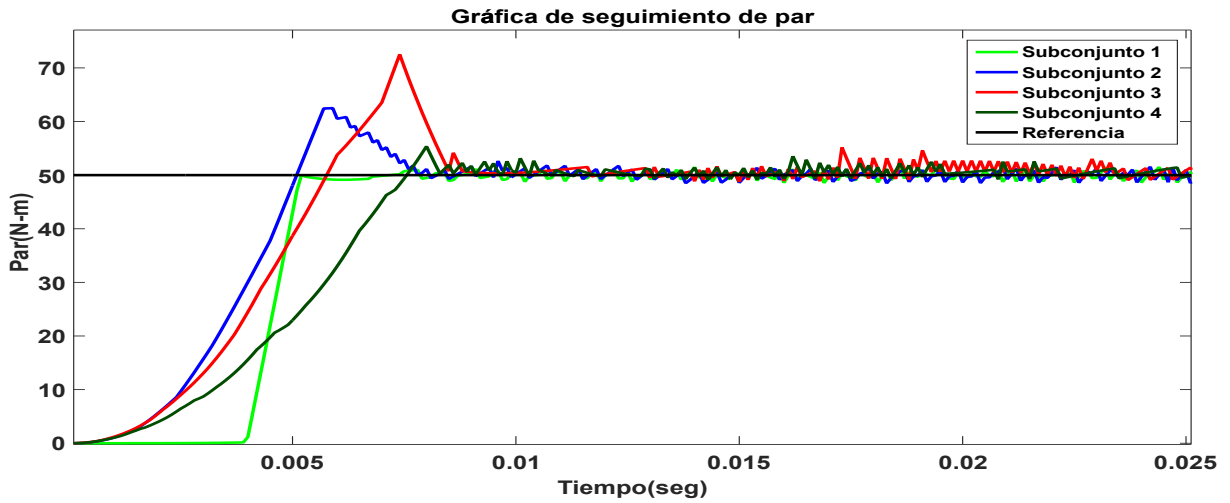
Primeramente en la figura 4.6 se muestra el seguimiento del par evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se puede observar en la figura 4.6(a) que utilizando el método para la reducción computacional el sistema sigue correctamente la referencia.

En la figura 4.6(b) se muestra que en el intervalo de tiempo de $t = 0 - 0.015s$ el sistema se comporta diferente dependiendo del subconjunto que se evalué. Evaluando el subconjunto 1 no presento un sobre impulso y convergió a la referencia en $t = 0.005s$. Evaluando el subconjunto 2 se muestra que el sistema tiene un sobre impulso de hasta 10N-m, sin embrago, converge a la referencia en $t = 0.01s$. Evaluando el subconjunto 3 también muestra un sobre impulso de 20N-m convergiendo a la referencia en $t = 0.01s$. Evaluando el subconjunto 4 se presentó un sobre impulso de 5N-m convergiendo a la referencia en $t = 0.01s$.

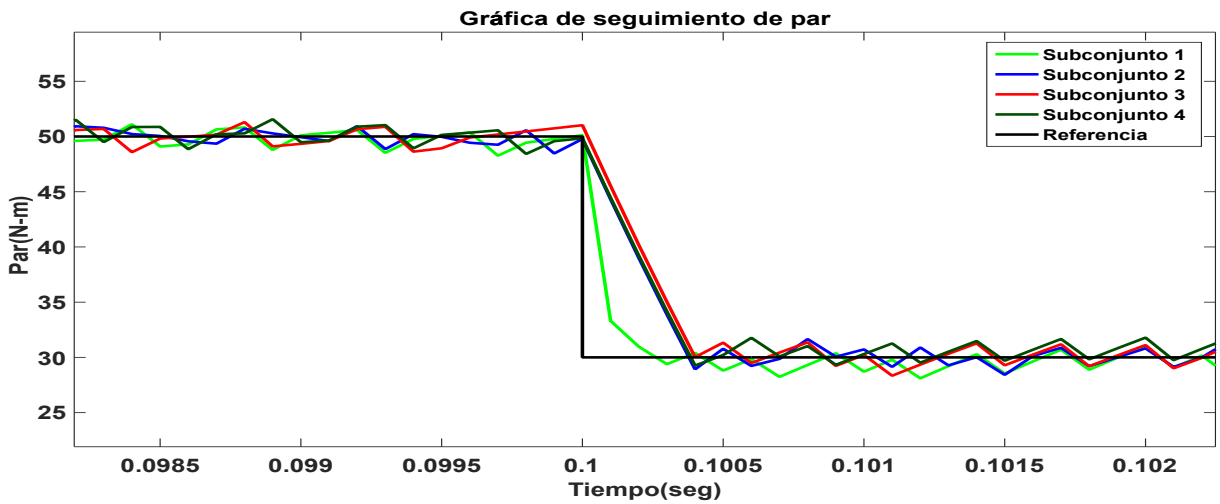
En la figura 4.6(c) se observa que al demandar un cambio de magnitud del par en $t = 1s$, el sistema llega a su referencia en un tiempo menor de 0.0005s para los diferentes subconjuntos de vectores que se evalúan.



(a) Seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



(b) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



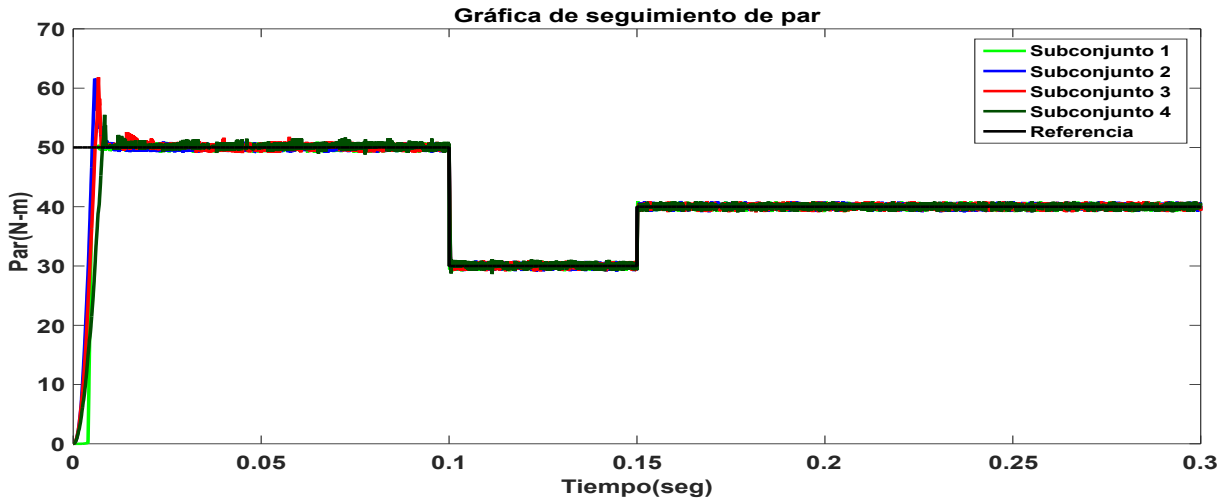
(c) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.

Figura 4.6: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

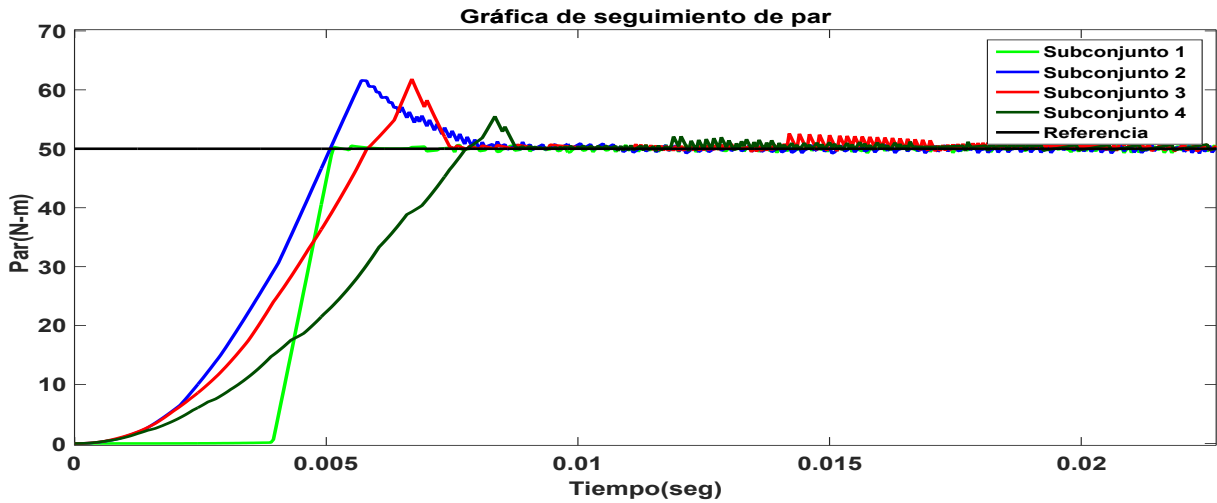
En la figura 4.7 se muestra el seguimiento del par evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Se aprecia en la figura 4.7(a) que el sistema tiene un correcto seguimiento de par evaluando diferentes subconjuntos de vectores.

En la figura 4.7(b) se muestra que el transitorio y el sobre impulso del par no tiene mayor cambio respecto a la simulación anterior empleando un $T_s = 100\mu s$ ya que ambos convergen a la referencia en menos de $0.01s$. En la figura 4.7(c) se muestra que el sistema al cambio de referencia en el tiempo $t = 1s$ converge en un tiempo menor a $0.0005s$ al igual que en la simulación anterior empleando un $T_s = 100\mu s$.

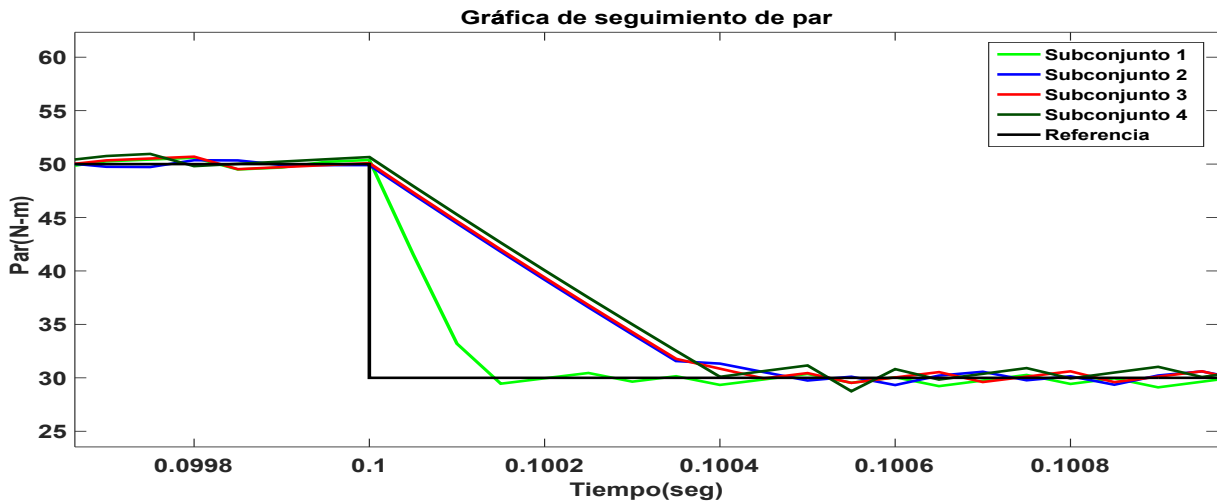
Un cambio que se puede apreciar es que al disminuir el tiempo de muestreo el error entre la referencia del par T_e^* y el par medido T_e disminuye con respecto a la prueba anterior utilizando un $T_s = 100\mu s$.



(a) Seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



(b) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



(c) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.

Figura 4.7: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

En la tabla 4.4 se muestran los errores RMS del par despreciando el transitorio, junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión, con tiempos de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se concluye que la evaluación de menos vectores no afectan en el error promedio de seguimiento de trayectoria, sin embargo se obtiene una reducción del 90% en la cantidad de cálculos por ciclo para el subconjunto 4 que va de 70° a 110° lo cual es una buena reducción en la carga computacional.

Resultados				
Subconjunto de vectores	Error RMS del par con $T_s = 100\mu s$	Error RMS del par con $T_s = 50\mu s$	Vectores evaluados	Reducción de cálculo
Subconjunto 1	0.8162	0.4125	125	<i>base</i> %
Subconjunto 2	0.7926	0.4161	22	82.4%
Subconjunto 3	0.8130	0.4151	16	87.2%
Subconjunto 4	0.8459	0.4360	12	90.4%

Tabla 4.4: Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 1.

En la figura 4.8 se muestra la velocidad angular de la máquina de inducción aplicando un control FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. Se observa que el comportamiento es similar en el sistema para todos los posibles subconjuntos, de igual manera que las pruebas anteriores la pendiente de la velocidad aumenta o disminuye dependiendo de la magnitud de par aplicado.

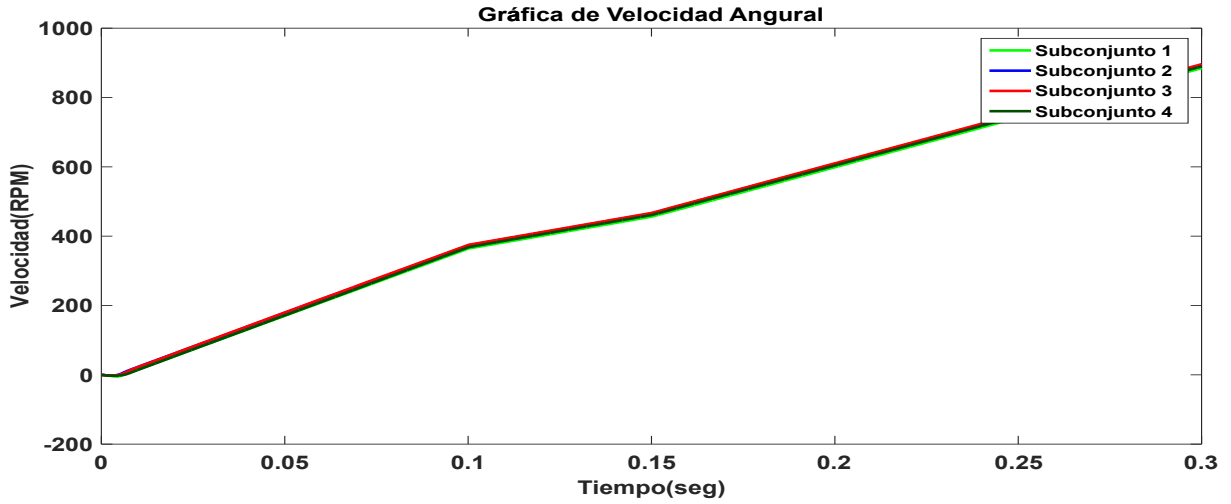


Figura 4.8: Velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ Prueba 1.

Flujo en el estator ψ_s

En la figura 4.9 se muestra el flujo del estator de la máquina de inducción aplicando un control FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. En el recuadro de la figura 4.9 se observa que mientras menor sea la cantidad de vectores que se evalúan mayor es el tiempo del transitorio. El sistema que evaluó el subconjunto 1 (0° a 360°) tuvo un transitorio con una duración de $0.0005s$, el sistema que evaluó el subconjunto 2 (30° a 150°) tuvo un transitorio con una duración de $0.0006s$, el sistema que evaluó el subconjunto 3 (60° a 120°) tuvo un transitorio con una duración de $0.05s$ y el sistema que evaluó el subconjunto 4 (70° a 110°) tuvo mayor transitorio con una duración de $0.1s$, sin embargo al converger a la referencia deseada el sistema se mantiene en ella a pesar de los cambios de referencia de par.

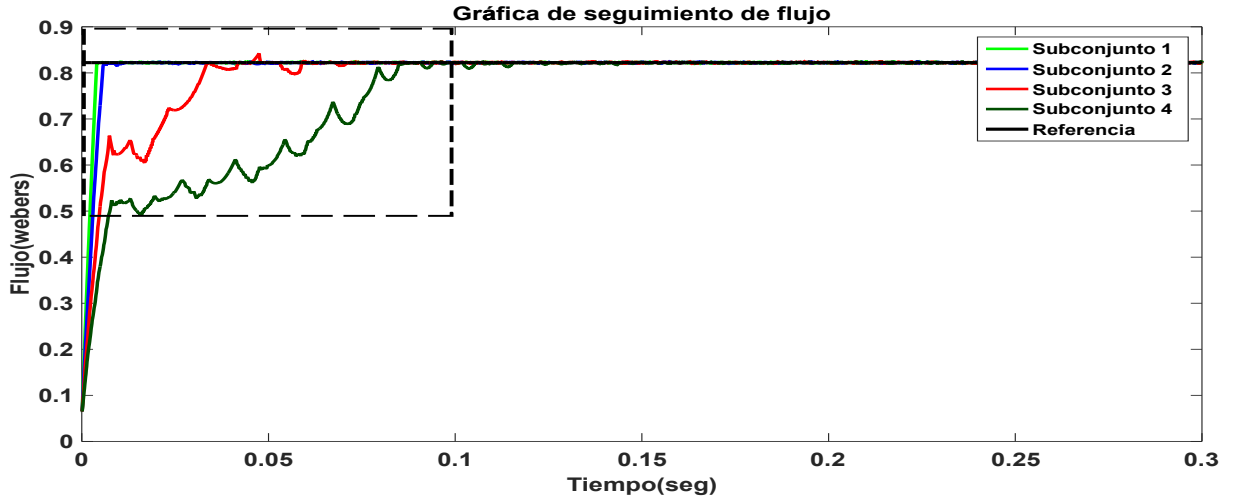


Figura 4.9: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

En la figura 4.10 se muestra el flujo del estator de la máquina de inducción aplicando un control FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En el recuadro de la figura 4.10 se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta un menor error entre la referencia del flujo $\vec{\psi}_s^*$ y el flujo del estator $\vec{\psi}_s$

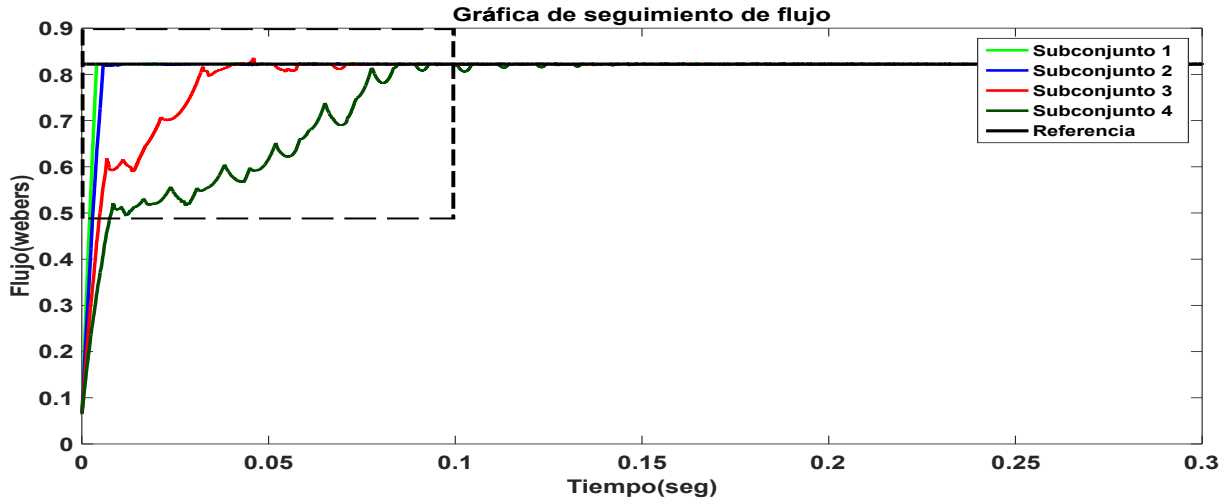


Figura 4.10: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

En la tabla 4.5 se muestran los errores RMS del flujo despreciando el transitorio, junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión, con tiempos de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Es preciso señalar que al evaluar diferentes subconjuntos de vectores no aumenta el error RMS, sin embargo al evaluar subconjuntos de vectores se obtiene una reducción del 90.4% en la cantidad de cálculos por ciclo para el subconjunto 4 (70° a 110°) lo cual es una buena reducción en la carga computacional.

Resultados				
Subconjunto de vectores	Error RMS del flujo con $T_s = 100\mu s$	Error RMS del flujo con $T_s = 50\mu s$	Vectores evaluados	Reducción de cálculo
Subconjunto 1	0.0018	0.0008	125	base%
Subconjunto 2	0.0018	0.0008	22	82.4%
Subconjunto 3	0.0018	0.0008	16	87.2%
Subconjunto 4	0.0018	0.0008	12	90.4%

Tabla 4.5: Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 1.

Tensiones en el estator V_s

Continuando con el análisis de resultados, en la figura 4.11 y 4.12 se muestran las tensiones de salida del inversor evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$,

respectivamente.

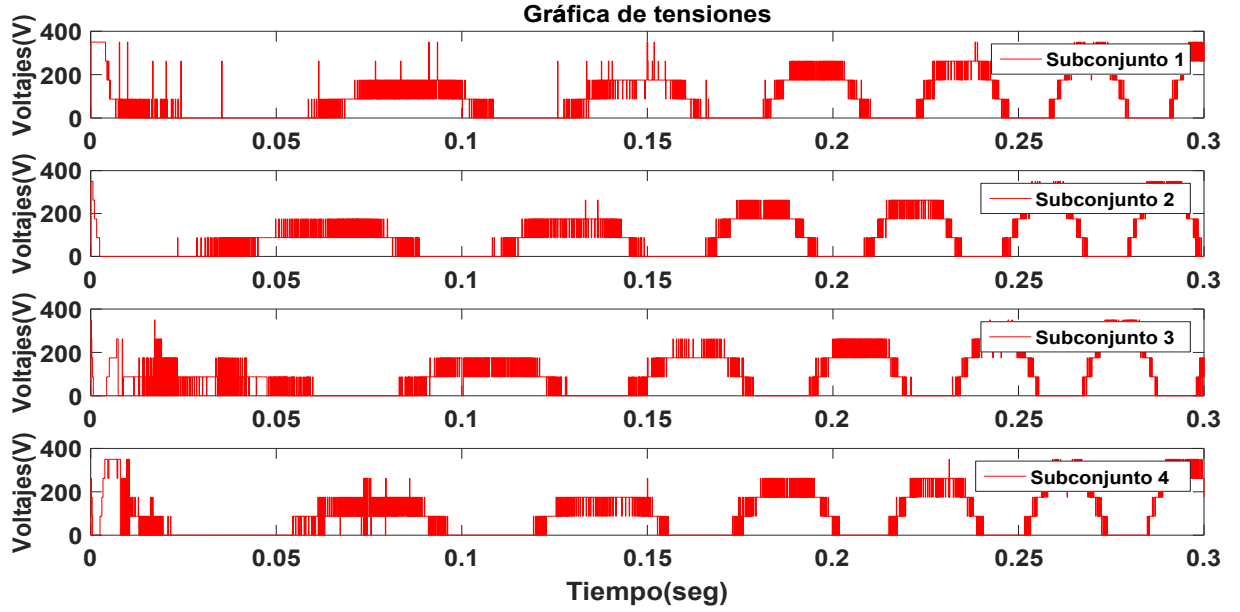


Figura 4.11: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

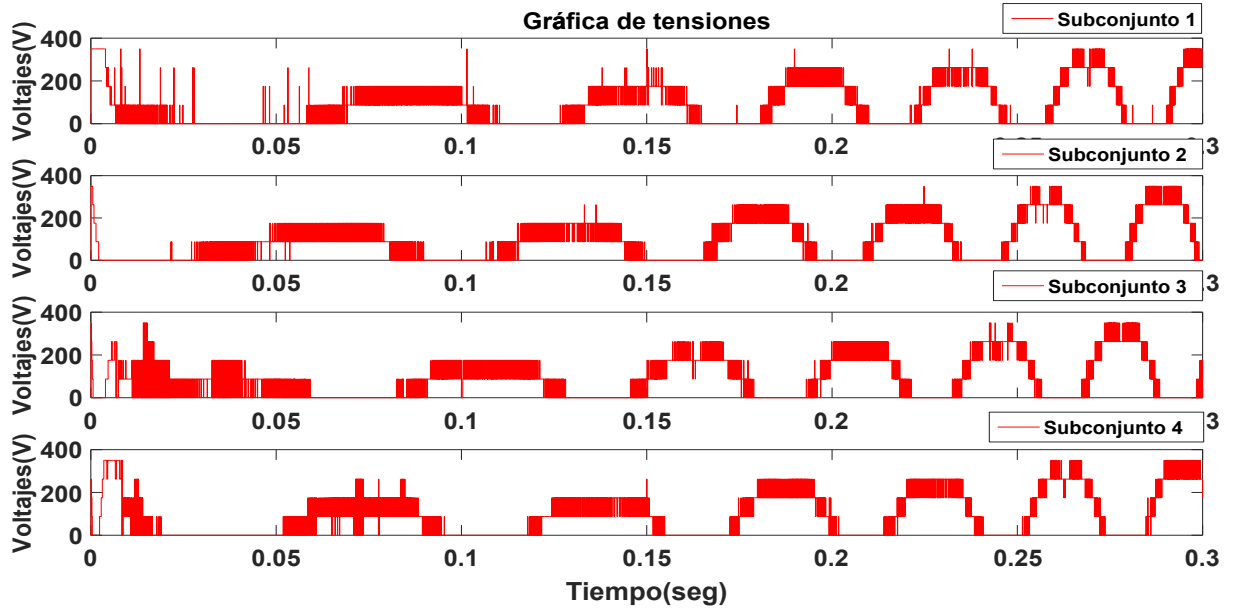


Figura 4.12: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

En la tabla 4.6 se muestra el total de vectores a evaluar y la reducción en %; los resultados se comparan con el subconjunto 1. Se observa que al reducir el ángulo del subconjunto menores son los vectores a evaluar como se muestra en el subconjunto 4 que tiene una reducción del 90.4 %.

Resultados			
Subconjunto	Numero de vectores a evaluar	Reducción en operaciones	Reducción
Subconjunto 1	125	Base	Base
Subconjunto 2	22	103	82.4 %
Subconjunto 3	16	109	87.2 %
Subconjunto 4	12	113	90.4 %

Tabla 4.6: Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 1.

En la tabla 4.7 se muestra el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión para cada subconjunto. Los resultados muestran que evaluando el subconjunto 2 (30° a 150°) fue el que presento menos saltos de nivel, también se logra apreciar que el sistema que evaluó el subconjunto 3 (60° a 120°) y el subconjunto 4 (70° a 110°), que son los que evalúan menos vectores, son los que presentaron más saltos de nivel. Para accionamientos de motores de alta potencia, la reducción de los valores de voltaje mejora la vida útil del motor.

Resultados												
Subconjunto	Tiempo de muestreo de $=T_s = 100\mu s$						Tiempo de muestreo de $=T_s = 50\mu s$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
subconjunto 1	1033	1023	1138	42	52	49	2101	1994	2219	79	82	62
subconjunto 2	1033	1000	1018	13	43	28	2110	2006	2027	42	81	75
subconjunto 3	1044	1019	1006	131	17	39	2159	2036	2007	298	66	71
subconjunto 4	1026	958	1009	65	136	79	2008	1925	2027	136	260	199

Tabla 4.7: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tension - Prueba 1.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 4.13-4.16, se muestran las corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase a se muestran en color rojo, para la fase b en color azul y para la fase c en color verde.

Se observa que al evaluar subconjuntos con menor número de vectores crea mayor distorsión en las corrientes, en el recuadro de las figuras 4.13 y 4.14 muestra la mayor distorsión en las corrientes al evaluar los subconjuntos 3 y 4.

Se observa que al aumentar la velocidad angular del motor hace que la distorsión disminuya y la frecuencia de la corriente aumente.

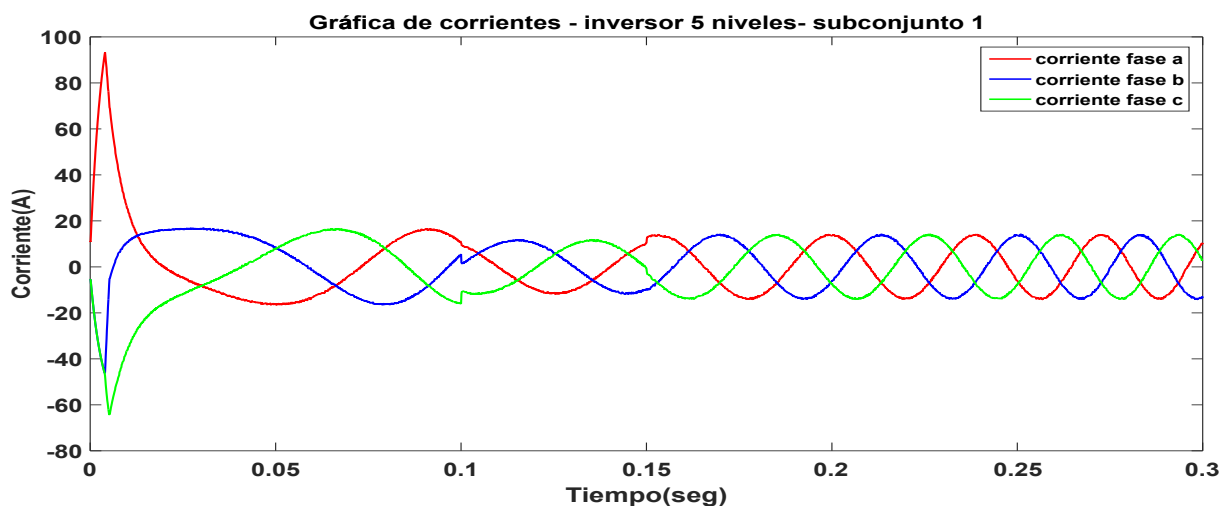


Figura 4.13: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

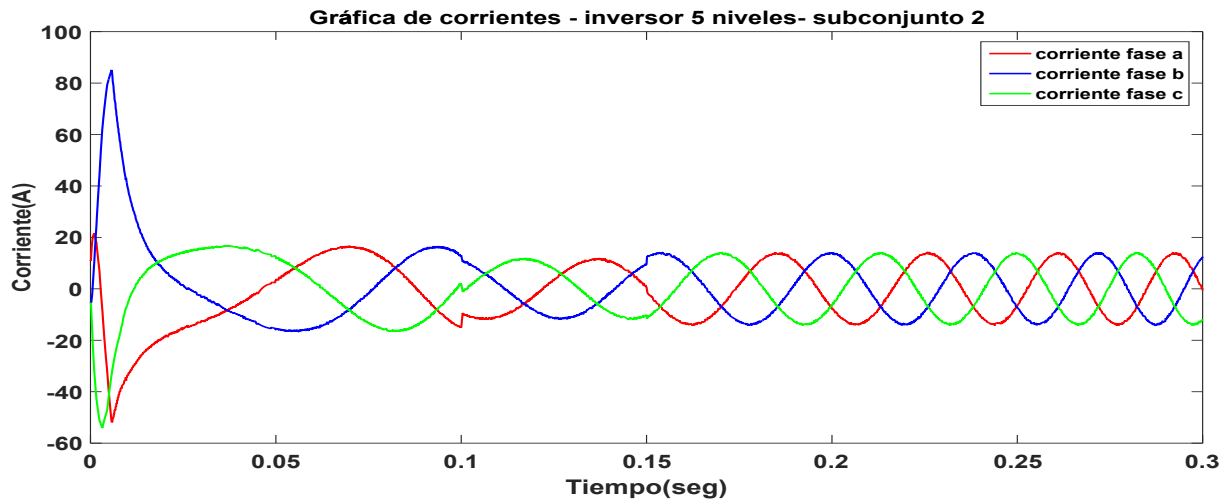


Figura 4.14: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

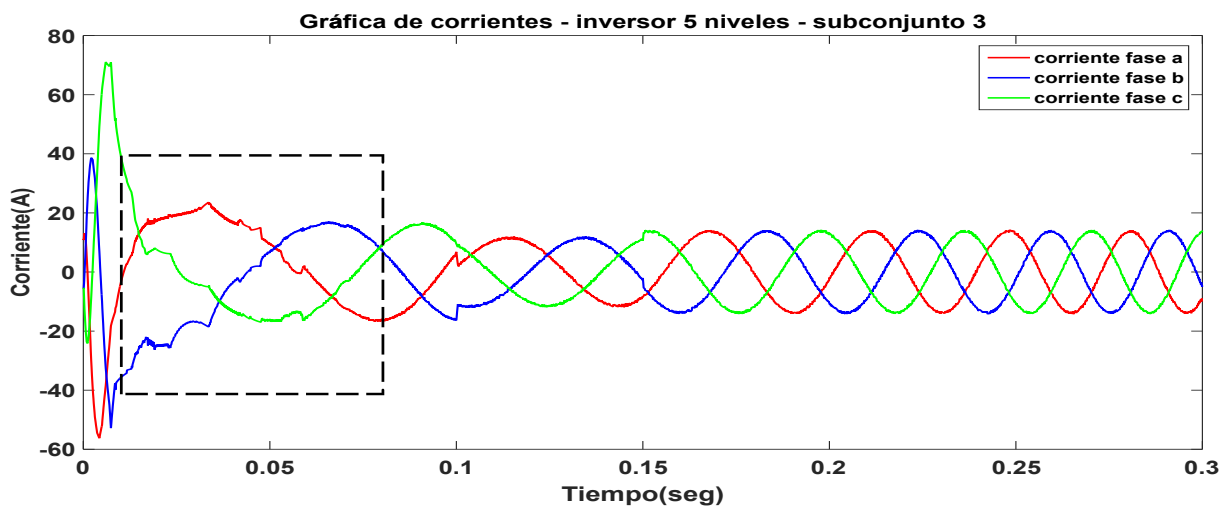


Figura 4.15: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

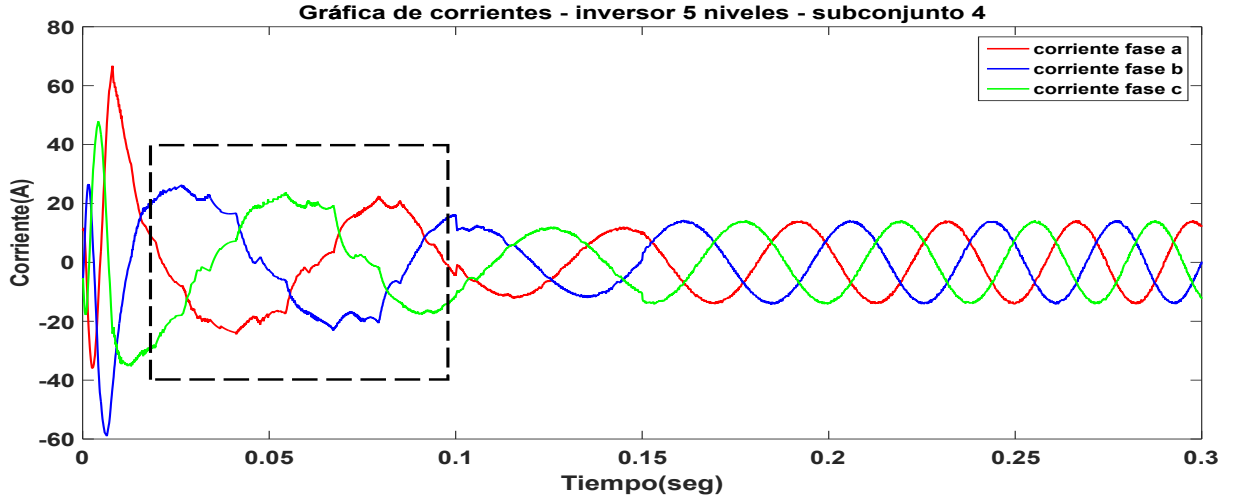


Figura 4.16: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 1.

En las figuras 4.17-4.20, se muestran las corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase a se muestran en color rojo, para la fase b en color azul y para la fase c en color verde.

Se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta una menor distorsión en las corrientes.

En el recuadro de la figura 4.19 y 4.20 muestra la mayor variación en las corrientes para el sistema que evalúa el subconjunto 3 y el subconjunto 4.

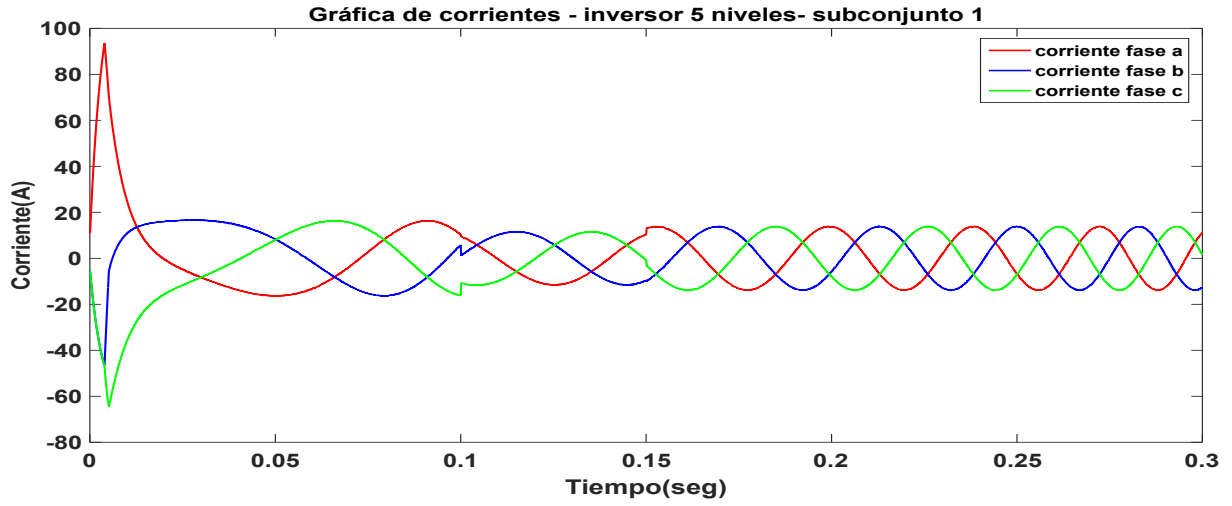


Figura 4.17: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

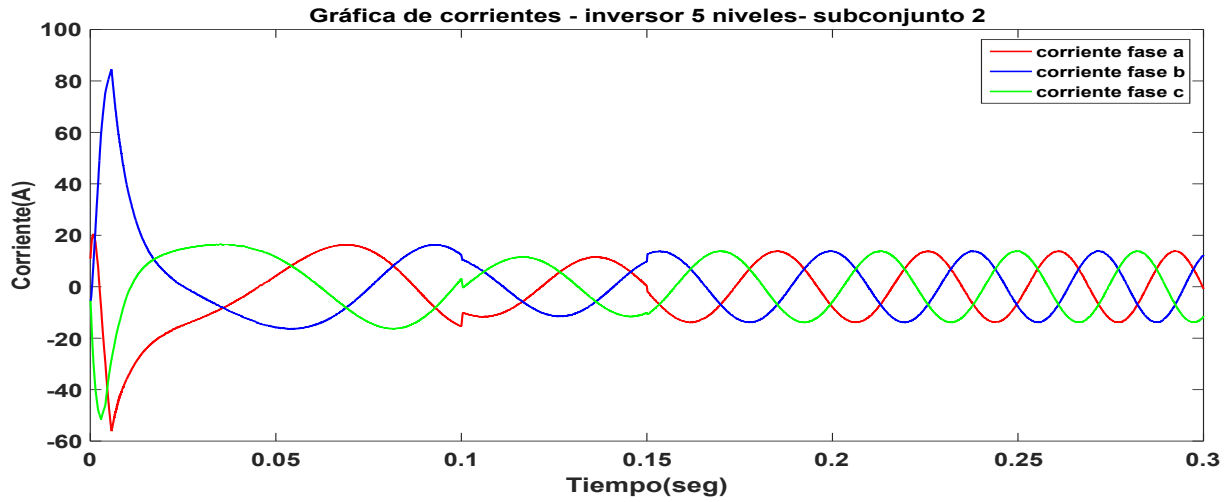


Figura 4.18: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

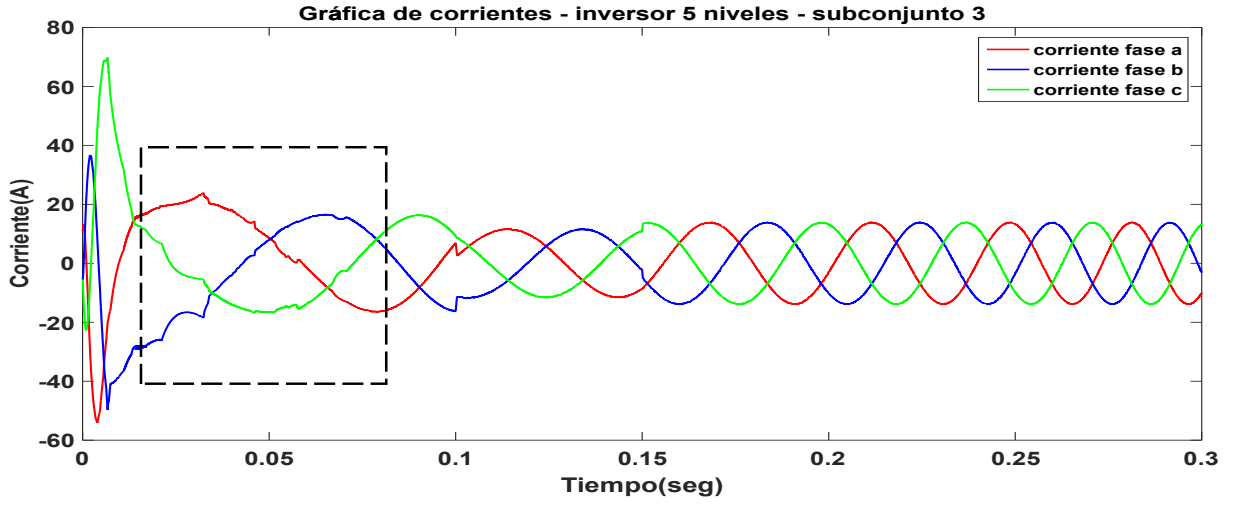


Figura 4.19: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

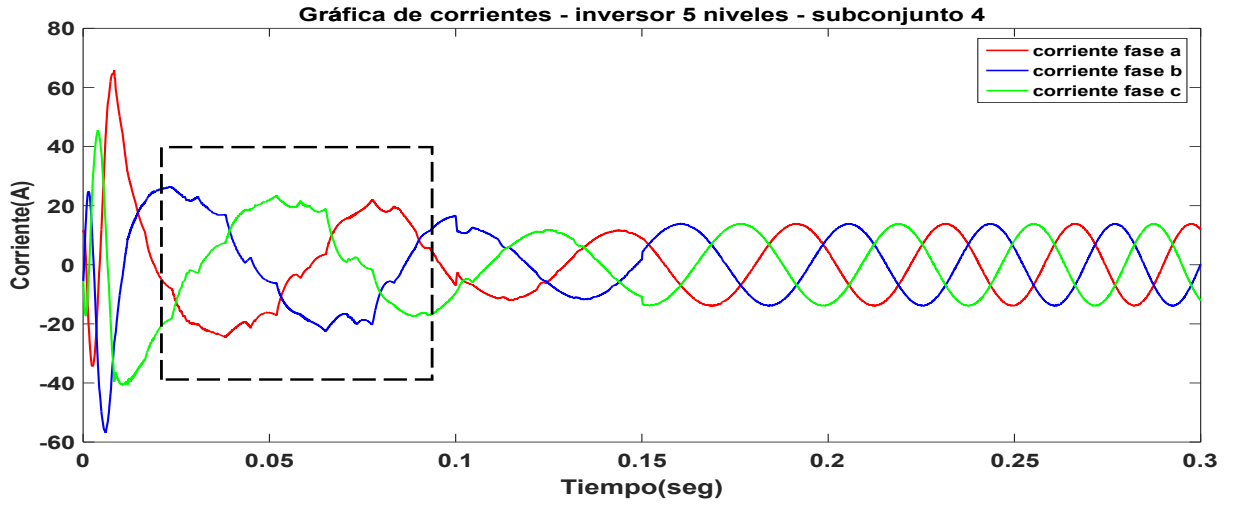


Figura 4.20: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 1.

En la tabla 4.8 se presenta el valor del rizo de las corrientes del estator evaluando diferentes subconjuntos con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran que el sistema que evalúa el subconjunto 1 y 2 tienen un menor rizo en el intervalo de $t = 0.02 - 0.1s$ conforme la velocidad aumenta el valor del rizo aumenta. Por el contrario para el sistema que evalúa el subconjunto 3 y 4 se puede observar que el mayor valor en el rizo se presentó en el intervalo de $t = 0.02 - 0.1s$ y conforme la velocidad aumenta el valor del rizo disminuye. Los resultados mues-

tran que al disminuir el tiempo de muestreo los valores del rizo se mantienen muy similares en cualquier intervalo de tiempo para cualquier subconjunto que se evalué. Mas adelante se presentará un análisis del contenido armónico total (THD), para tener una apreciación cuantitativa de sus características.

Resultados				
Subconjunto	Tiempo de muestreo = $100\mu s$		Tiempo de muestreo = $50\mu s$	
	Rizo máximo		Rizo máximo	
	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s
subconjunto 1	1.10 A	1.27 A	0.61 A	0.66 A
subconjunto 2	1.14 A	1.35 A	0.58 A	0.67 A
subconjunto 3	1.40 A	1.26 A	0.68 A	0.65 A
subconjunto 4	1.32 A	1.18 A	0.67 A	0.68 A

Tabla 4.8: Valor del rizo máximo en las corrientes evaluando diferentes subconjuntos - Prueba 1.

4.3.2. Prueba 2.-Tren de par implementando reducción computacional con flujo nominal antes de un cambio de referencia del par

En esta prueba se evalúa la respuesta del control ante un tren de par de referencia. Primero se lleva el motor a un flujo nominal de 0.8 webers en el intervalo de $t = 0 - 0.005s$. Después se demanda una secuencia de par de 50 - 30 - 40 N-m, con un intervalo de 0.005 - 0.1 - 0.15-segundos entre cada cambio de magnitud y manteniendo la misma referencia de flujo de 0.8 webers, también se sigue tomando en cuenta el método de reducción computacional donde se evalúan diferentes subconjuntos de vectores dados por la tabla 4.3.

Se induce la máquina con flujo nominal antes de un cambio de par con el objetivo de mejorar los transitorios del flujo del estator y los sobre impulsos de par presentados al inicio de la prueba. Las pruebas se realizaron con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

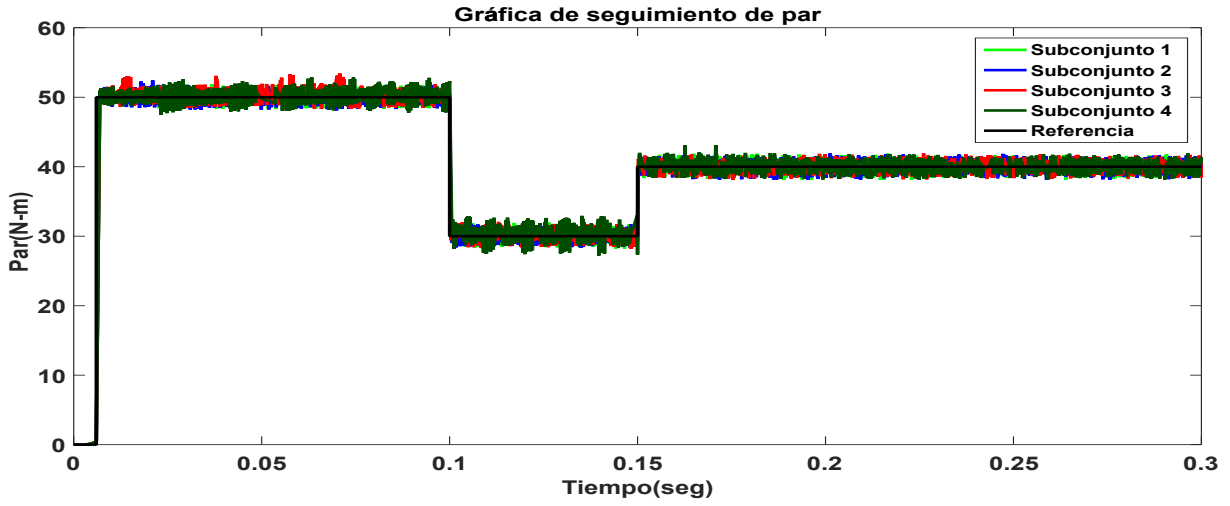
Par T_e -Velocidad ω_r

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a la prueba II aplicando el método de reducción de cálculos. El sistema tomando el subconjunto 1 se muestra con una traza de color verde claro, el subconjunto 2 se muestra de color azul, el subconjunto 3 se muestra de color rojo, el subconjunto 4 se muestra en verde fuerte siguiendo la referencia mostrada en color negro.

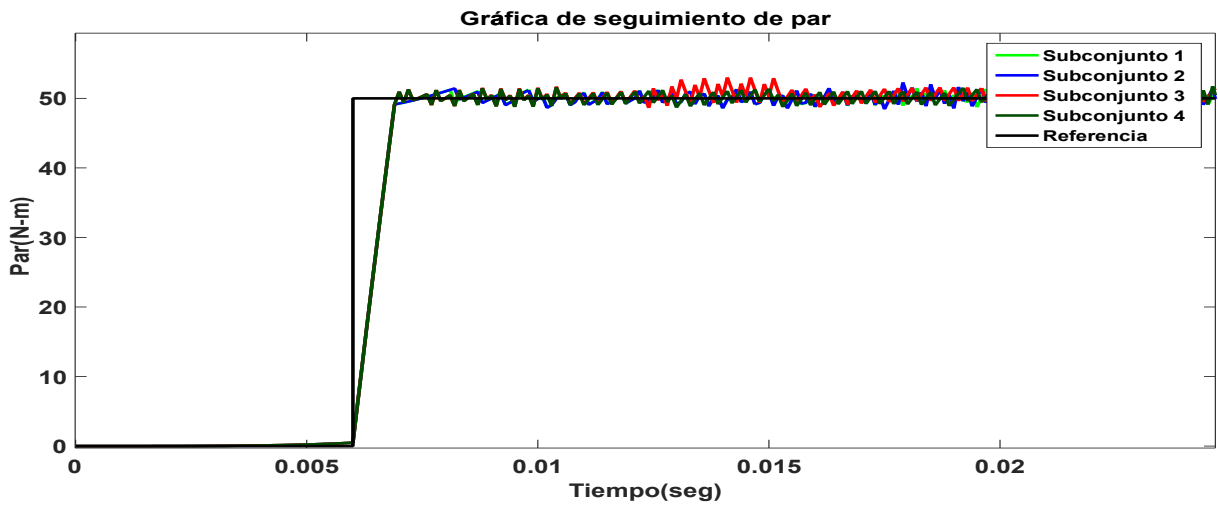
En la figura 4.21 se muestra el seguimiento del par de la máquina de inducción aplicando un control FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se observa en la figura 4.21(a) que el comportamiento en el seguimiento de par es el adecuado en todo el transcurso de la simulación y que el transitorio del par al inicio de la prueba a disminuido.

A diferencia de la prueba I la figura 4.21(b) muestra que mantener flujo nominal en el estator antes de demandar un par de referencia ayuda al transitorio del sistema ya que no se presentó un sobre impulso cuando se pide un escalón de par al inicio de la prueba.

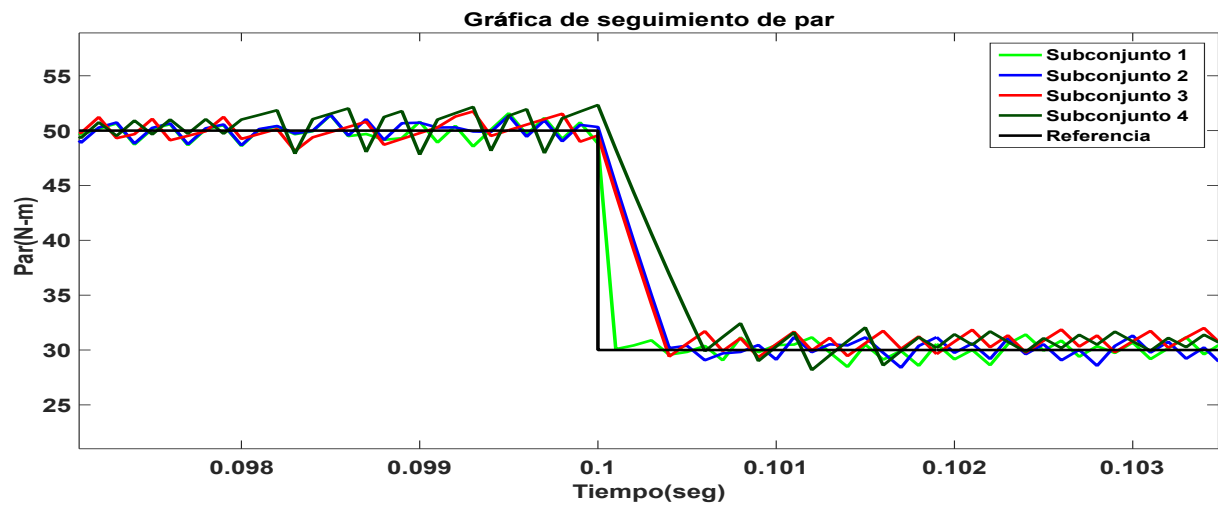
Además en la figura 4.21(c) se muestra que el sistema al tener un cambio de referencia en el tiempo $t = 1s$ el sistema converge en menos 0.001s.



(a) Seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



(b) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



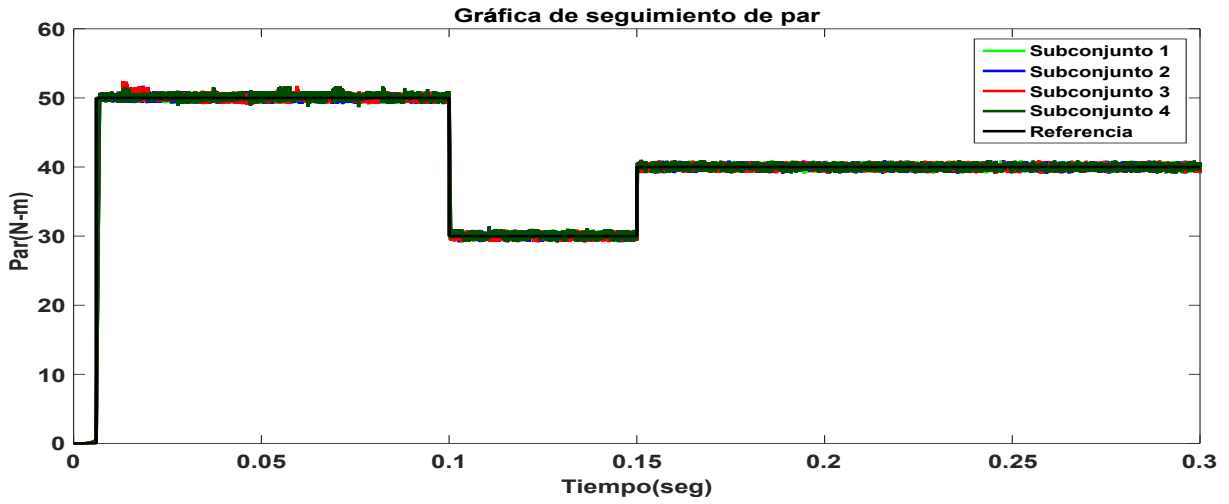
(c) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.

Figura 4.21: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

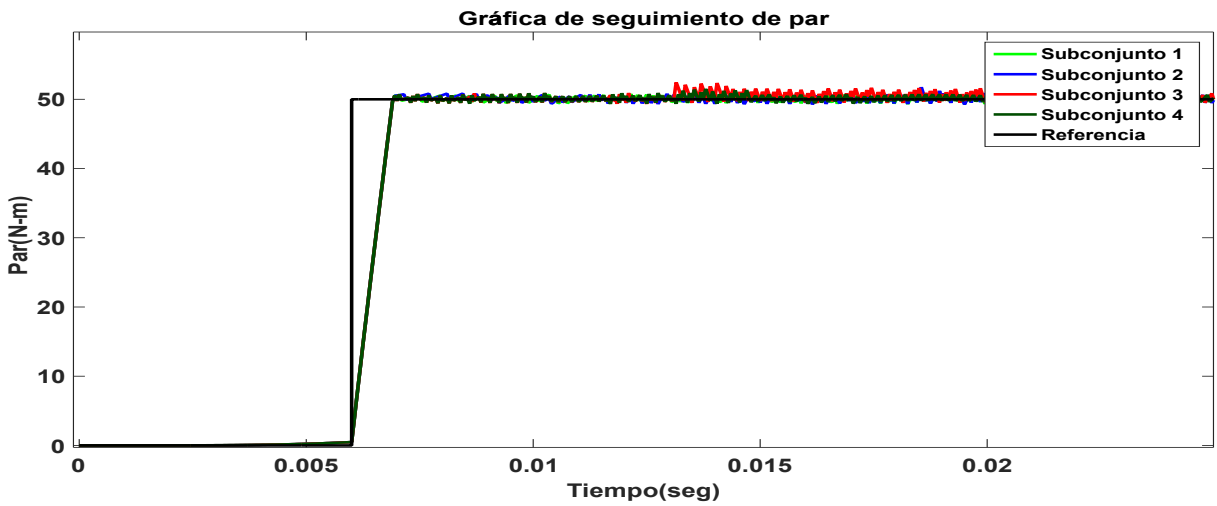
En la figura 4.22 se muestra el seguimiento del par usando un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En la figura 4.22(a) se muestra que el seguimiento de par es el adecuado en todo el transcurso de la simulación.

En la figura 4.22(b) muestra que mantener flujo nominal en el estator antes de un cambio en la referencia de par ayuda al transitorio del sistema ya que no se presentó un sobre impulso cuando el sistema parte de cero a una referencia de par en escalón al inicio de la prueba.

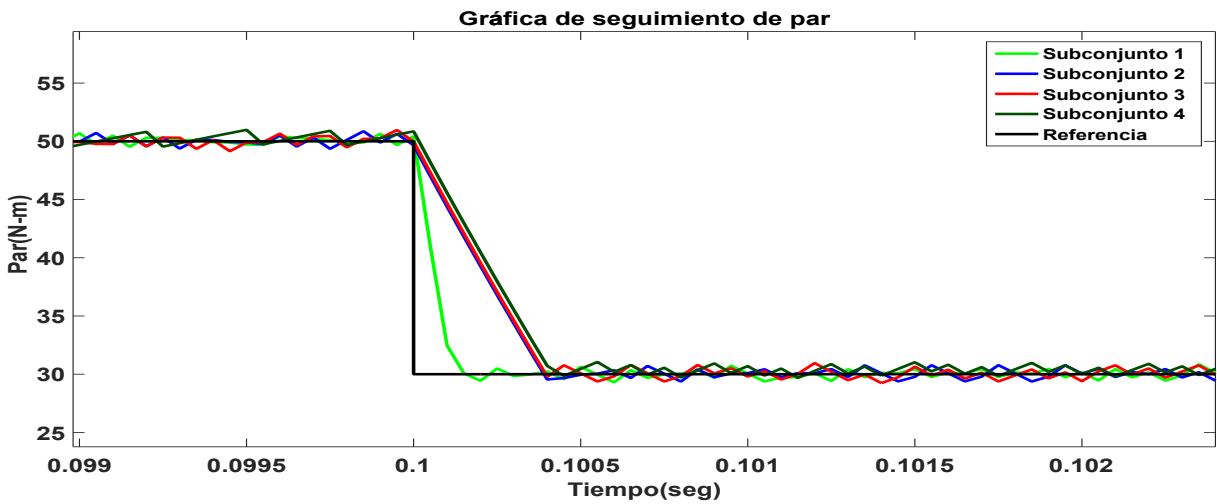
En la figura 4.22(c) se muestra que al disminuir el tiempo de muestreo a $T_s = 50\mu s$ no afecta en el transitorio del sistema ya que ambos sistemas de esta misma prueba al cambio de magnitud del par en el $t = 0.1s$ convergen a la referencia en un tiempo menor a $0.0005s$, sin embargo se observa que al disminuir el tiempo de muestreo disminuye el error entre la referencia del par T_e^* y el par de la máquina T_e comparando con la simulación anterior de esta misma prueba.



(a) Seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



(b) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



(c) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.

Figura 4.22: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

En la tabla 4.9 se muestran los errores RMS del par despreciando el transitorio, junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión, con tiempos de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se observa que estableciendo el flujo nominal antes de demandar un par de referencia al inicio de la prueba, y la evaluación de menos vectores no afectan en el error promedio de seguimiento de trayectoria, además se obtiene una reducción del 90 % en la cantidad de cálculos por ciclo para el subconjunto 4 (70° a 110°) lo cual es una buena reducción en la carga computacional.

Resultados				
Subconjunto de vectores	Error RMS del par con $T_s = 100\mu s$	Error RMS del par con $T_s = 50\mu s$	Vectores evaluados	Reducción de cálculo
Subconjunto 1	0.8058	0.4127	125	<i>base</i> %
Subconjunto 2	0.8276	0.4096	22	82.4 %
Subconjunto 3	0.8361	0.4159	16	87.2 %
Subconjunto 4	0.8477	0.4298	12	90.4 %

Tabla 4.9: Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 2.

En la figura 4.23 se muestra la velocidad angular de la máquina de inducción aplicando un control FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores y con flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. Se observa que el comportamiento es similar en el sistema para todos los posibles subconjuntos, de igual manera que las pruebas anteriores la pendiente de la velocidad aumenta o disminuye dependiendo de la magnitud de par aplicado.

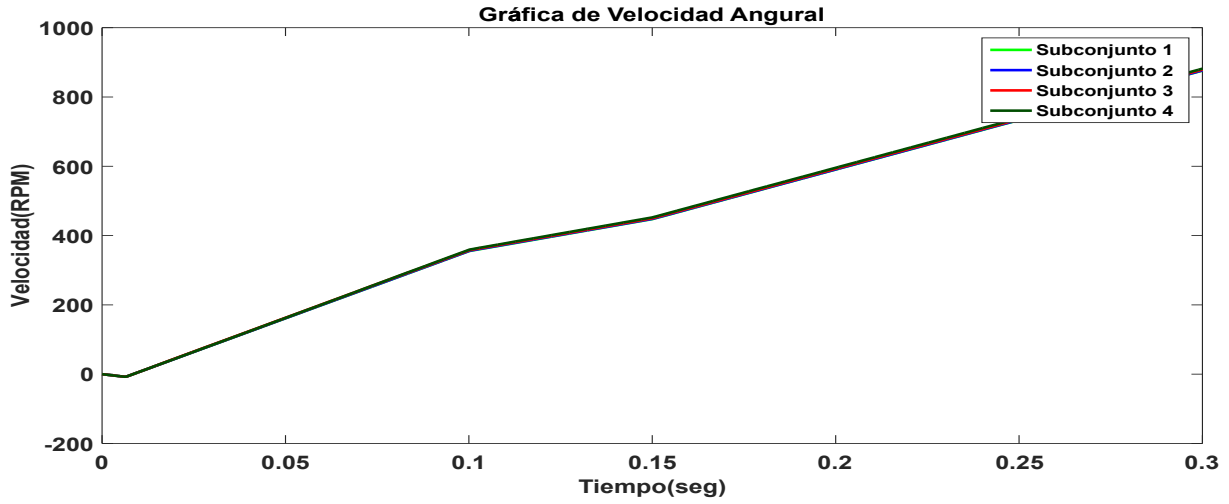


Figura 4.23: Velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ -Prueba 2.

Flujo en el estator ψ_s

En la figura 4.24 se muestra el flujo del estator evaluando diferentes subconjuntos de vectores y estableciendo el flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Note en el recuadro marcado en la figura 4.24 que mantener flujo nominal en el estator antes de un cambio de referencia de par no aporta en el transitorio ya en ambas pruebas I y II tienen el mismo transitorio con una duración de 0.1 s evaluando los subconjuntos 3 y 4. También se logra apreciar que en la prueba I al cambiar la referencia del par la magnitud del flujo llega a 0.5 webers a diferencia de la prueba II que el flujo llega a valores de 0.7 webers.

Mas adelante se presentará una estrategia para reducir el transitorio en el flujo del estator.

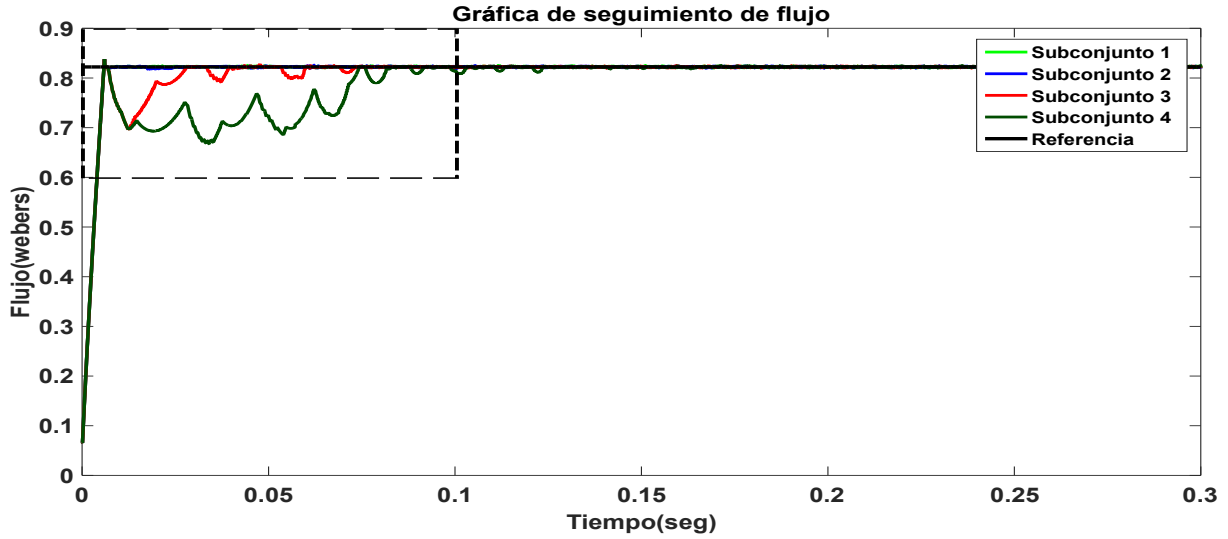


Figura 4.24: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.

En la figura 4.25 se muestra el flujo del estator con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En el recuadro de la figura 4.25 se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta un menor error entre la referencia del flujo $\vec{\psi}_s^*$ y el flujo del estator $\vec{\psi}_s$.

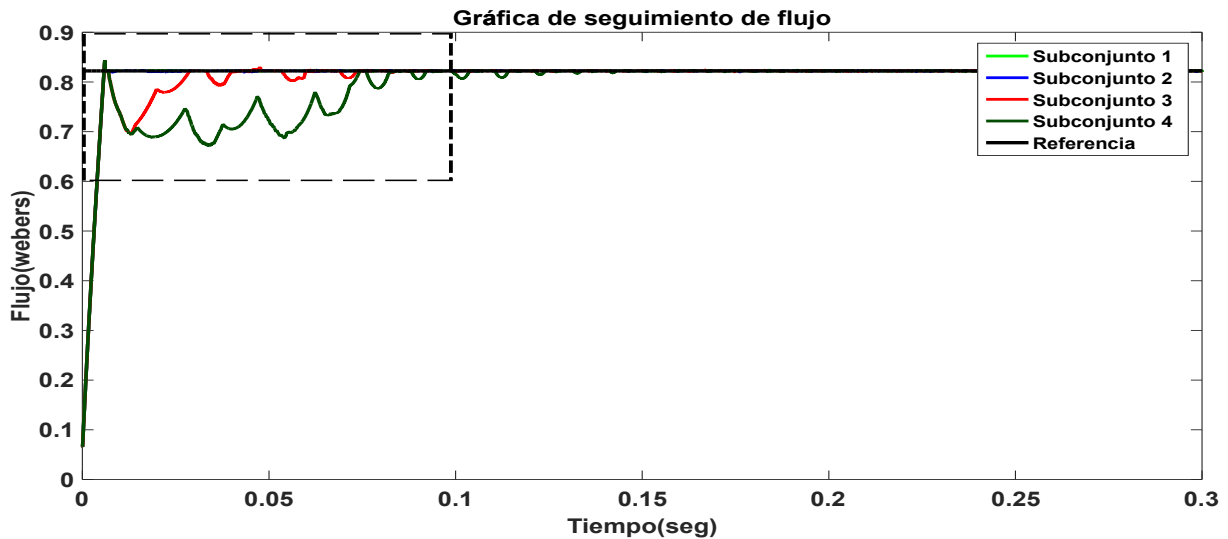


Figura 4.25: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.

En la tabla 4.10 se presentan los valores en RMS del error del flujo despreciando el transitorio, también los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempos de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. La tabla muestra que al pasar el transitorio se tienen los mismos valores de error promedio para todos los subconjuntos evaluados. Sin embargo, aplicando el método de reducción de cálculos los vectores a evaluar se reducen hasta un 90.4 %.

Resultados				
Subconjunto de vectores	Error RMS del flujo con $T_s = 100\mu s$	Error RMS del flujo con $T_s = 50\mu s$	Vectores evaluados	Reducción de cálculo
Subconjunto 1	0.0018	0.0008	125	<i>base</i> %
Subconjunto 2	0.0018	0.0008	22	82.4 %
Subconjunto 3	0.0018	0.0008	16	87.2 %
Subconjunto 4	0.0018	0.0008	12	90.4 %

Tabla 4.10: Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 2.

Tensiones en el estator V_s

En la figura 4.26 y 4.27 se muestran las tensiones de salida del inversor evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. En estas figuras podemos observar que al inicio de la prueba en $t = 0 - 0.05s$ segundos las tensiones aplicadas al estator no tienen saltos de nivel evaluando cualquier subconjunto diferencia de la prueba I como se muestra en las figuras 4.11y 4.12.

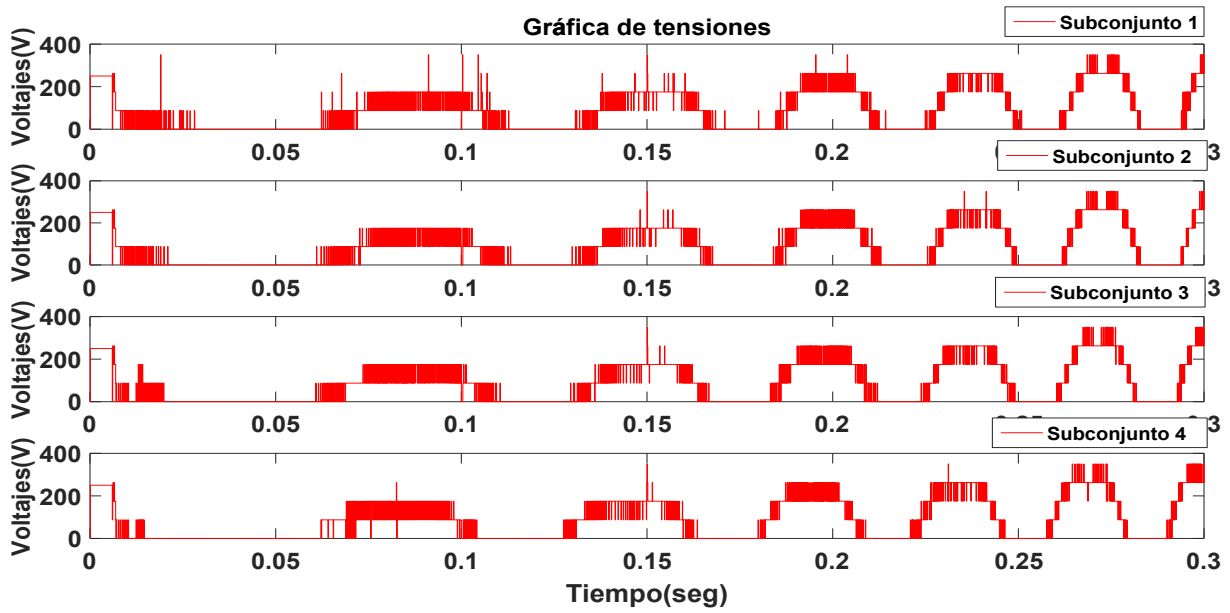


Figura 4.26: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

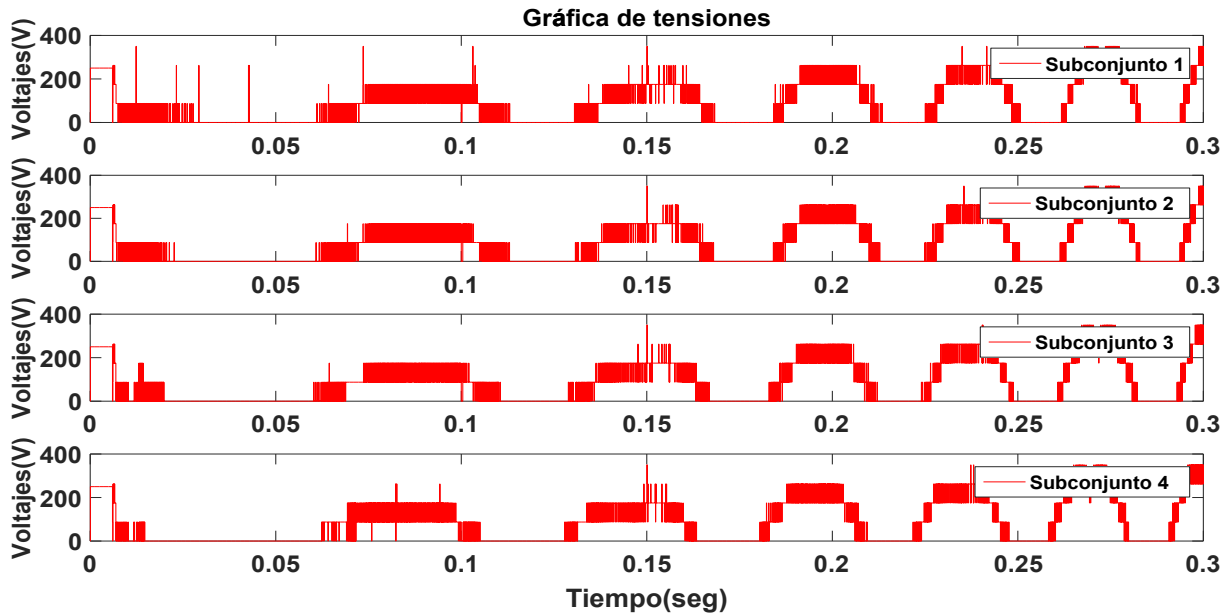


Figura 4.27: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

En la tabla 4.11 se muestra el total de vectores a evaluar y su reducción en %; los resultados se

comparan con el subconjunto 1. Se observa que al reducir el ángulo del subconjunto menores son los vectores a evaluar como se muestra en el subconjunto 4 que tiene una reducción del 90.4 %.

Resultados			
Subconjunto	Número de vectores a evaluar	Reducción en operaciones	Reducción
Subconjunto 1	125	Base	Base
Subconjunto 2	22	103	82.4 %
Subconjunto 3	16	109	87.2 %
Subconjunto 4	12	113	90.4 %

Tabla 4.11: Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 2.

En la tabla 4.12 se muestra el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión para cada subconjunto. Los resultados muestran que evaluando el subconjunto 2 (30° a 150°) fue el que presento menos saltos de nivel, también se logra apreciar que el sistema que evaluó el subconjunto 3 (60° a 120°) y el subconjunto 4 (70° a 110°), que son los que evalúan menos vectores, son los que presentaron más saltos de nivel. También se logra apreciar una reducción en el número de saltos en más de un nivel con respecto a la prueba anterior.

Resultados												
Subconjunto	Tiempo de muestreo de $= T_s = 100\mu s$						Tiempo de muestreo de $= T_s = 50\mu s$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c
subconjunto 1	1007	1067	1102	45	49	43	2012	2076	2223	59	70	55
subconjunto 2	951	1061	1050	21	34	17	1915	2152	2113	40	76	36
subconjunto 3	966	1131	1015	28	137	25	1919	2236	2076	50	269	74
subconjunto 4	938	1016	1015	37	98	68	1888	2063	2032	73	215	139

Tabla 4.12: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 2.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 4.28-4.31, se muestran las corrientes de fase, aplicando FCS-MPC evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase a se muestran en color rojo, para la fase b en color azul y para la fase c en

color verde.

En el recuadro de la figura 4.30 y 4.31 muestra que la mayor variación en la corriente se presentó en el intervalo de $t = 0.02 - 0.1s$ para el sistema que evalúa los subconjuntos 3 y 4.

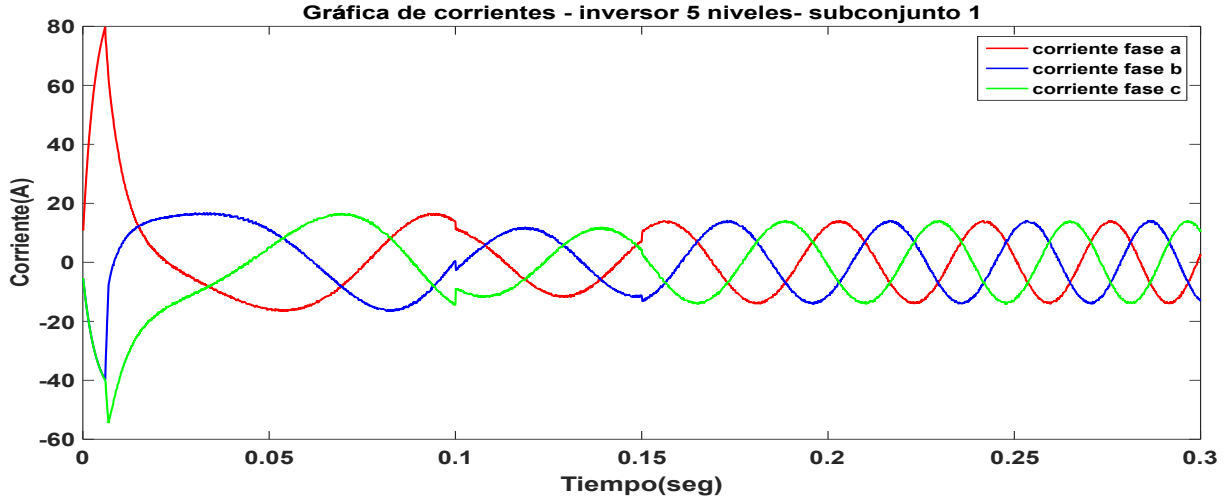


Figura 4.28: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

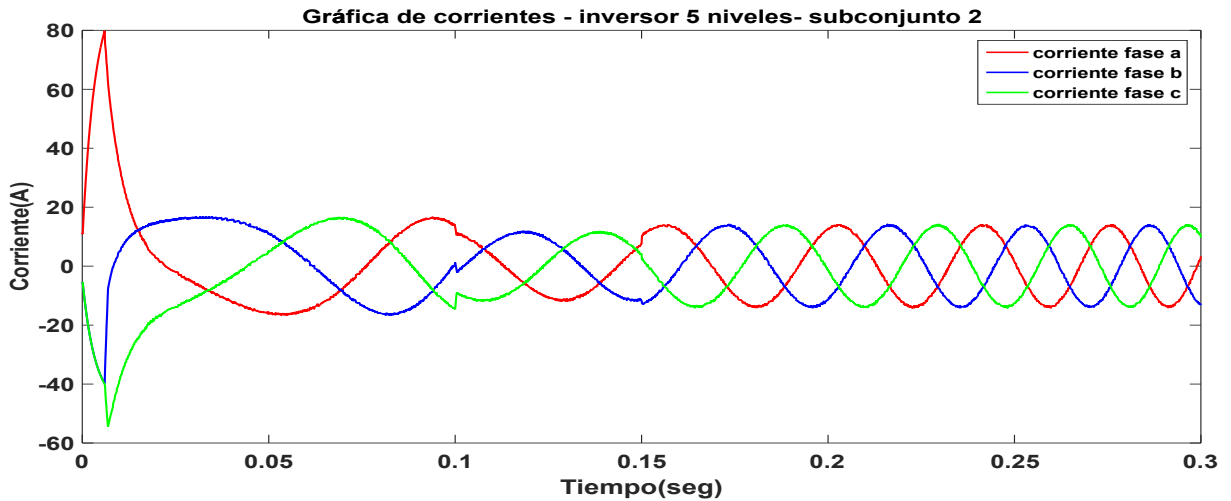


Figura 4.29: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 2.

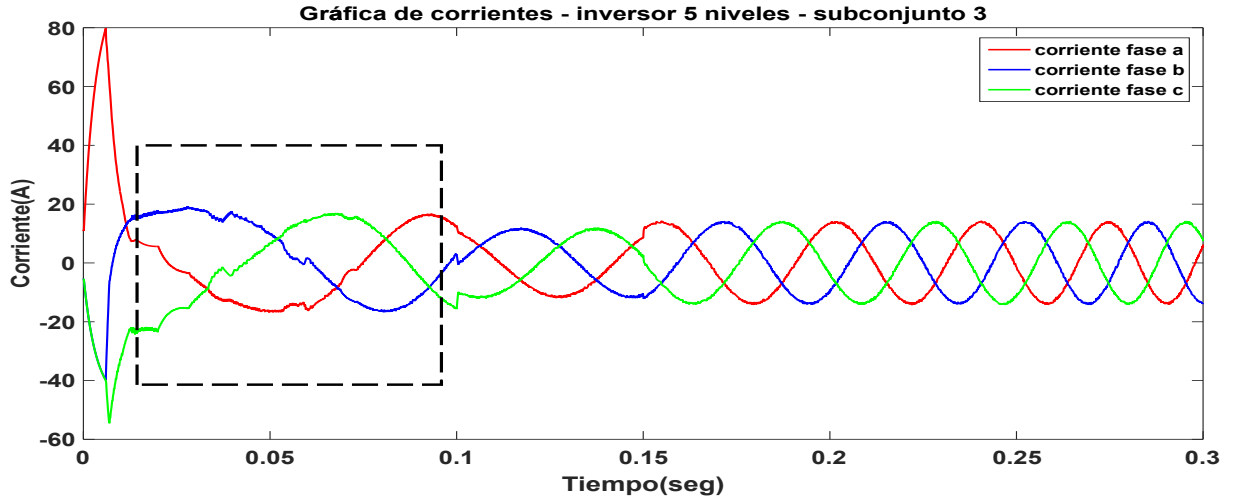


Figura 4.30: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.

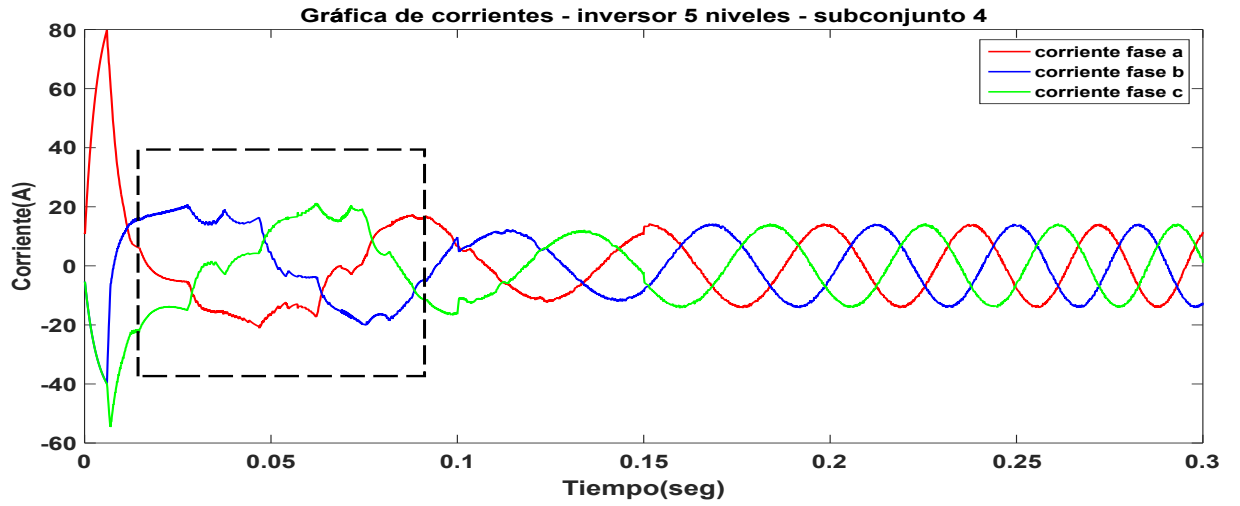


Figura 4.31: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.

En las figuras 4.32-4.35, se muestran las corrientes de fase, aplicando FCS-MPC evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

Se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo, el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta una menor distorsión en las corrientes. En el recuadro de la figura 4.34 y 4.35 se puede apreciar que la mayor variación en las corrientes se presentó en el intervalo de tiempo de $t = 0.02 - 0.1s$ para el sistema que evalúa el subconjunto 3 y el subconjunto 4.

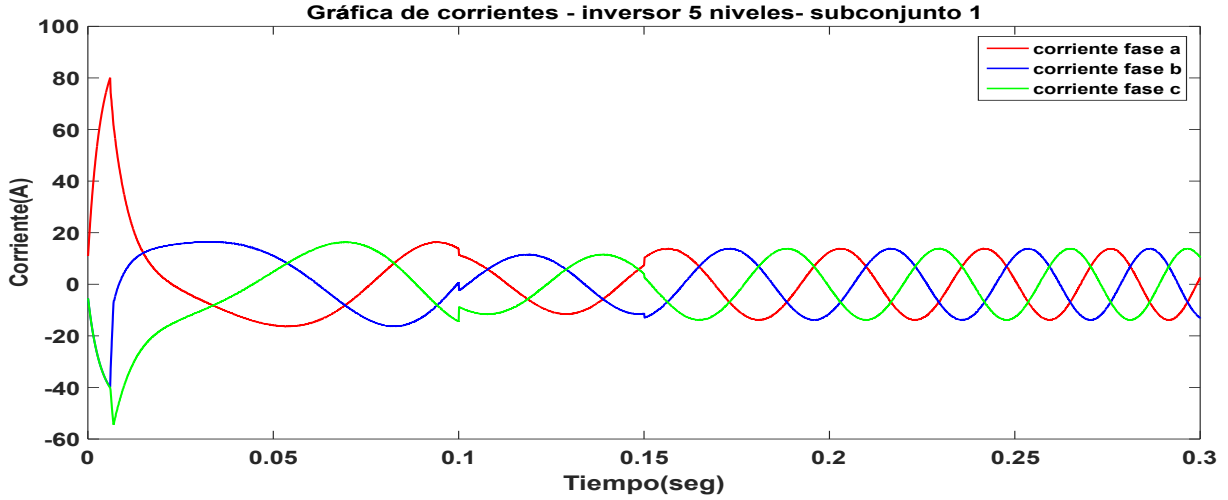


Figura 4.32: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

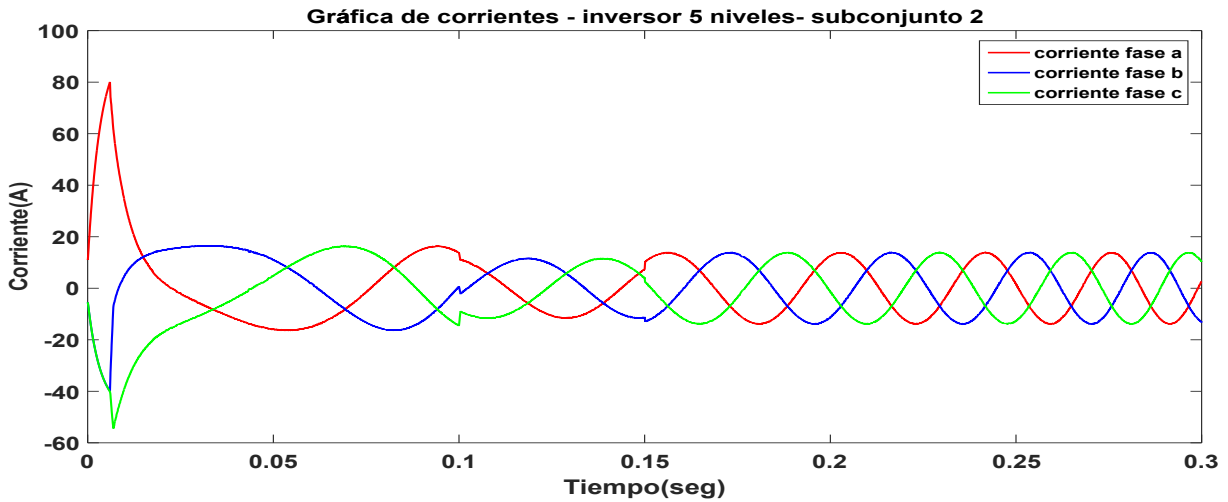


Figura 4.33: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 2.

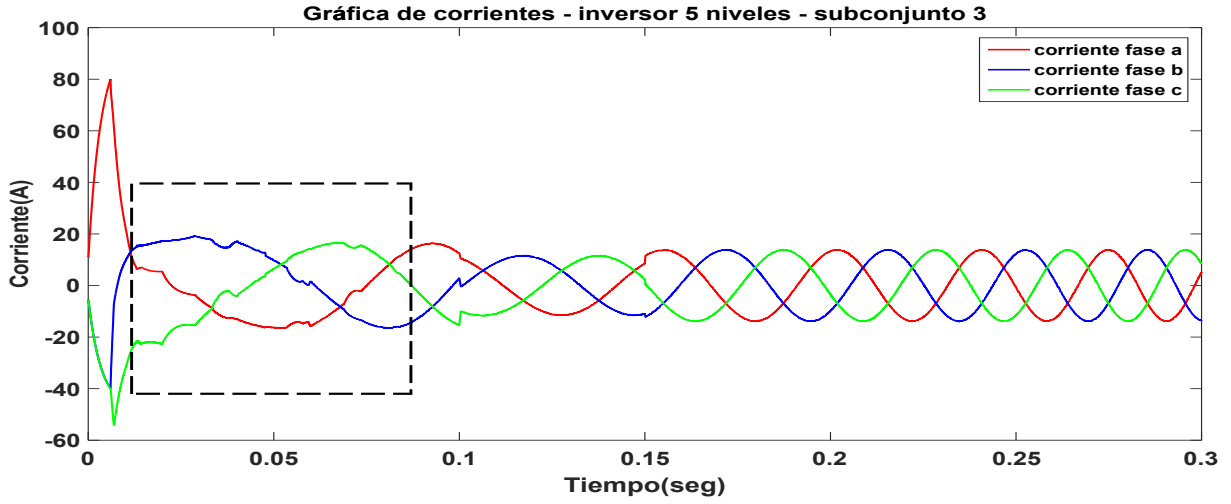


Figura 4.34: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.

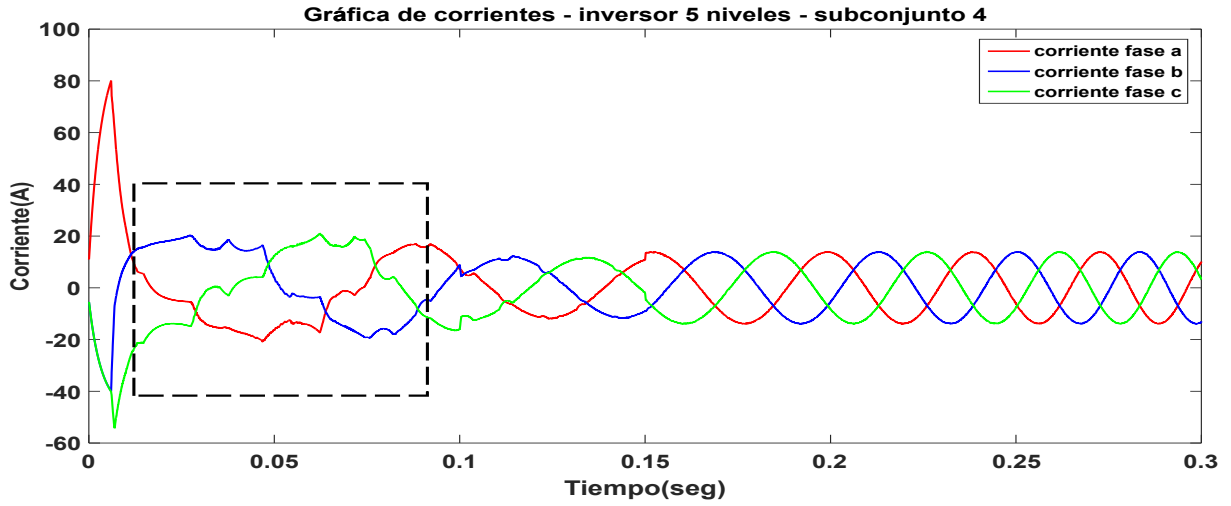


Figura 4.35: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 2.

En la tabla 4.13 se presenta el valor del rizo de las corrientes del estator evaluando diferentes subconjuntos con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran que estableciendo el flujo nominal antes de un cambio de referencia de par no aporta gran cambio a los valores del rizo de la corriente con respecto a la prueba I. Mas adelante se presentará un análisis del contenido armónico total (THD), para tener una apreciación cuantitativa de sus características.

Resultados				
Subconjunto	Tiempo de muestreo = $100\mu s$		Tiempo de muestreo = $50\mu s$	
	Rizo máximo		Rizo máximo	
	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s
subconjunto 1	1.09 A	1.22 A	0.59 A	0.68 A
subconjunto 2	1.24 A	1.23 A	0.61 A	0.66 A
subconjunto 3	1.10 A	1.30 A	0.68 A	0.73 A
subconjunto 4	1.44 A	1.38 A	0.72 A	0.74 A

Tabla 4.13: Valor del rizo máximo en las corrientes evaluando diferentes subconjuntos - Prueba 2.

4.3.3. Prueba 3.-Tren de par implementando reducción computacional con factor de peso en el flujo del estator

En esta prueba se evalúa la respuesta del control ante un tren de par de referencia. Primero se lleva el motor a un flujo nominal de 0.8 webers en el intervalo de $t = 0 - 0.005s$. Después se demanda una secuencia de par de 50 - 30 - 40 N-m, con un intervalo de 0.005 - 0.1 - 0.15-segundos entre cada cambio de magnitud y manteniendo la misma referencia de flujo de 0.8 webers, posteriormente se demanda una secuencia de par de -40 - 50 N-m en el intervalo de 0.3 - 0.45 segundos, el objetivo es replicar el transitorio del par y del flujo que se presenta al inicio de la prueba. Se sigue tomando en cuenta el método de reducción computacional donde se evalúan diferentes subconjuntos de vectores dados por la tabla 4.3.

En esta prueba se integrará un factor de peso λ a la función de costo, como se muestra en la ecuación 4.5; el objetivo es mejorar los transitorios en el flujo del estator. Los valores del factor de peso se determinaron siguiendo los pasos que se presentan en [12]. El factor de peso se integró en los subconjuntos que presentaron mayor transitorio en las pruebas anteriores. En la tabla 4.14 se muestran los valores del factor de peso λ para los diferentes subconjuntos. Las pruebas se realizaron con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

$$J_i = \left| T_e^* - T_e^{k+1} \right| + \lambda \left| \overrightarrow{\psi_s^{*k}} - \overrightarrow{\psi_s^{k+1}} \right| \quad (4.5)$$

Subconjunto	Valor del factor de peso
Subconjunto 1	na
Subconjunto 2	na
Subconjunto 3	1.4
Subconjunto 4	2.1

Tabla 4.14: Tabla de valores del factor de peso.

Par T_e -Velocidad ω_r

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a la prueba III aplicando el método de reducción de cálculos. El sistema tomando el subconjunto 1 se muestra con una traza de color verde claro, el subconjunto 2 se muestra de color azul, el subconjunto 3 se muestra de color rojo, el subconjunto 4 se muestra en verde fuerte siguiendo la referencia mostrada en color negro.

En la figura 4.36 se muestra el seguimiento del par, integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de demandar un par de referencia con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se observa que al tener un factor de peso para dar prioridad al flujo del estator tiene cierta implicación en el par, ya que se muestra mayor error en el seguimiento del par en comparación con la prueba anterior.

Los recuadros marcados en la figura 4.36 muestran que la mayor distorsión del par se presentó en dos intervalos de tiempo, el primero se presentó en el intervalo de $t = 0 - 0.1s$ y el segundo se presentó en el intervalo de $t = 0.4 - 0.5s$, en ambos intervalos la velocidad angular se encontraba por debajo de los 400 RPM.

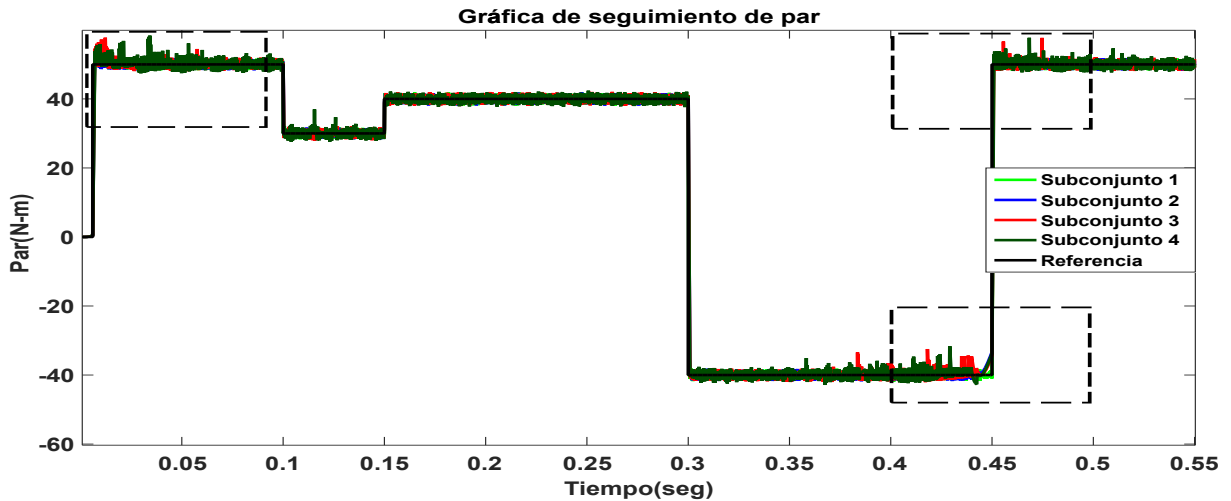


Figura 4.36: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.

En la figura 4.37 se muestra el seguimiento del par, integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de demandar un par de referencia con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En los recuadros de la figura la figura 4.37 se observa el mismo comportamiento en el seguimiento del par con respecto a la simulación anterior con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo, al disminuir el tiempo de muestreo se observa que el error del par disminuye.

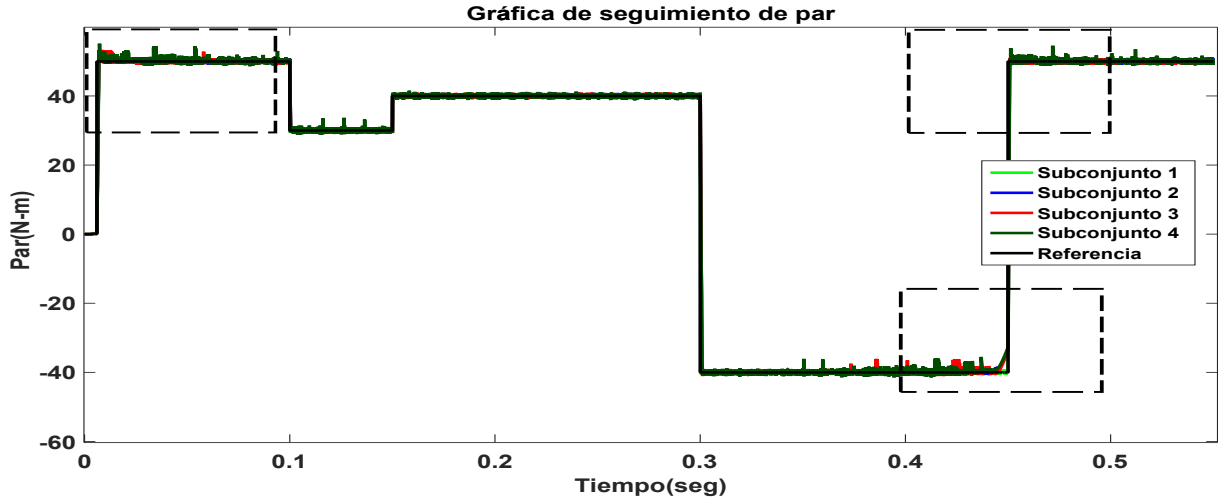


Figura 4.37: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.

En la tabla 4.15 se muestran los errores RMS del par y los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados que se presentan en la tabla 4.15 son tomados en diferentes intervalos de tiempo con el objetivo de ver la diferencia con las pruebas anteriores.

Se observa que al tener un factor de peso para dar prioridad al flujo del estator aumenta los errores RMS del seguimiento del par en los intervalos de $t = 0.02 - 0.1s$ y $t = 0.4 - 0.5s$, el mayor aumento en el error se presentó en el sistema que evaluó los subconjuntos 3 y 4. También se puede observar que después de cierto tiempo el error del par disminuye como se observa en el intervalo de tiempo $t = 0.1 - 0.3s$, en este intervalo de tiempo la velocidad era superior a los 400 RPM.

Resultados								
Subconjunto de vectores	Error RMS del par con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del par con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de cálculo
	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s	t=0.4-0.5s	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s	t=0.4-0.5s		
Subconjunto 1	0.8112	0.8062	0.8135	0.4087	0.4127	0.4079	125	Base
Subconjunto 2	0.8543	0.8280	0.8713	0.4287	0.4092	0.4502	22	82.4%
Subconjunto 3	1.2853	0.8850	1.5750	0.5265	0.4381	0.8718	16	87.2%
Subconjunto 4	1.6039	0.9734	1.6900	0.7853	0.4845	1.057	12	90.4%

Tabla 4.15: Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 3.

En la figura 4.38 se muestra la velocidad angular cuando se integra un factor de peso en la función de costo y con flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. Se observa que el comportamiento es similar en el sistema para todos los posibles subconjuntos, de igual manera que las pruebas anteriores la pendiente de la velocidad aumenta o disminuye dependiendo de la magnitud de par aplicado.

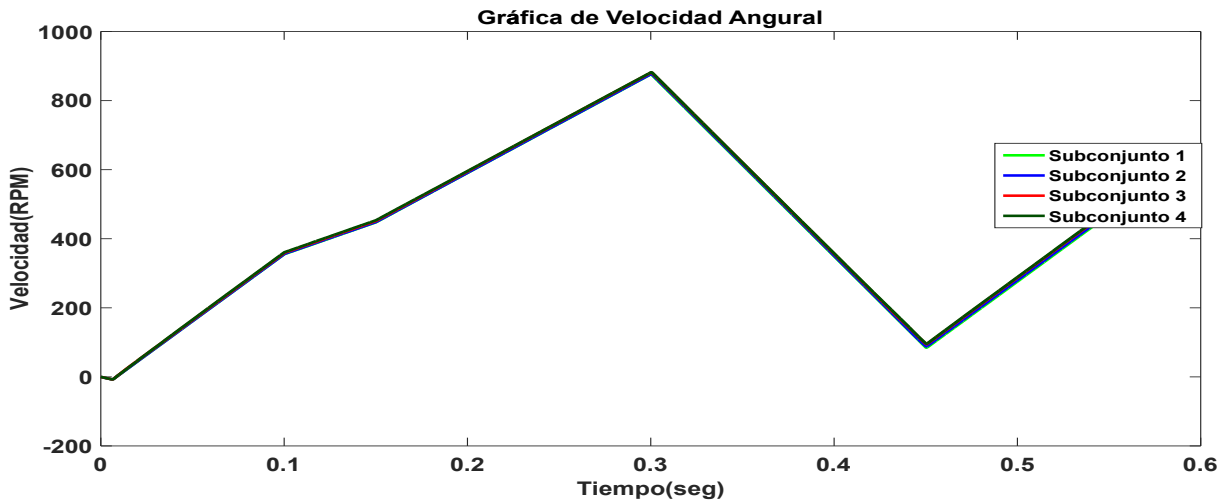


Figura 4.38: Velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

Flujo en el estator ψ_s

En la figura 4.39 se muestra el flujo del estator, integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se observa que al tener un factor de peso para dar prioridad al flujo del estator reduce el transitorio del flujo como se presentó en los subconjuntos 3 y 4, el transitorio de ambos sistemas fue menor a $t = 0.1s$.

En los recuadros de la figura 4.39 se observa que se presentaron dos transitorios uno ocurrió en el intervalo de $t = 0 - 0.05s$ y el segundo se presentó en el intervalo de $t = 0.4 - 0.5s$, ambos transitorios se presentaron cuando la velocidad angular se encontraba por debajo de los 400 RPM.

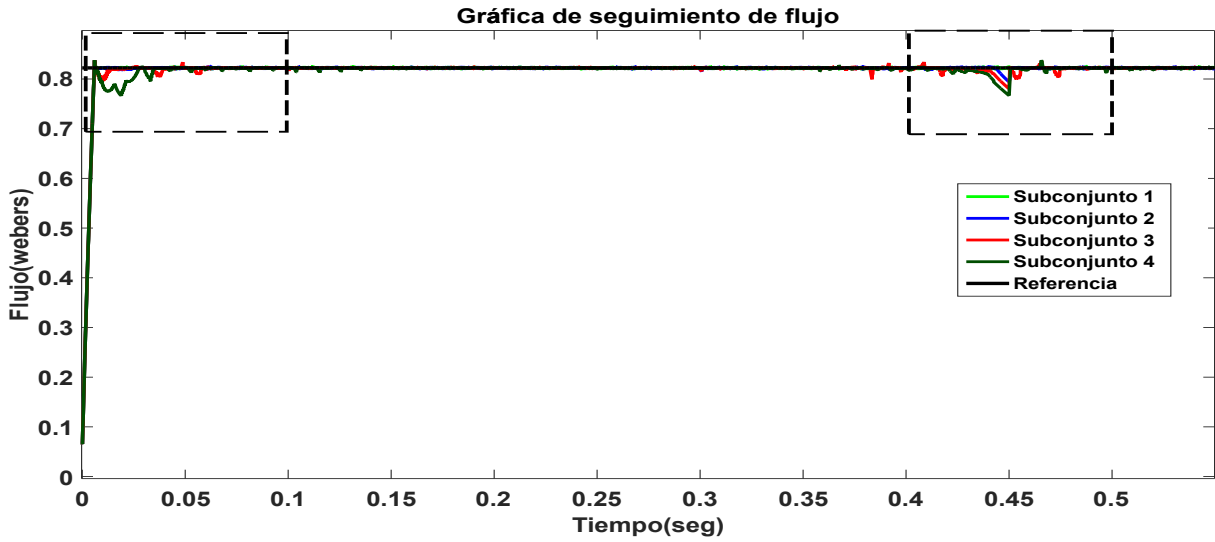


Figura 4.39: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.

En la figura 4.40 se muestra el flujo del estator, integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En los recuadros de la figura 4.40 se observa que se presentaron dos transitorios uno ocurrió en el intervalo de $t = 0 - 0.05s$ y el segundo se presentó en el intervalo de $t = 0.4 - 0.5s$.

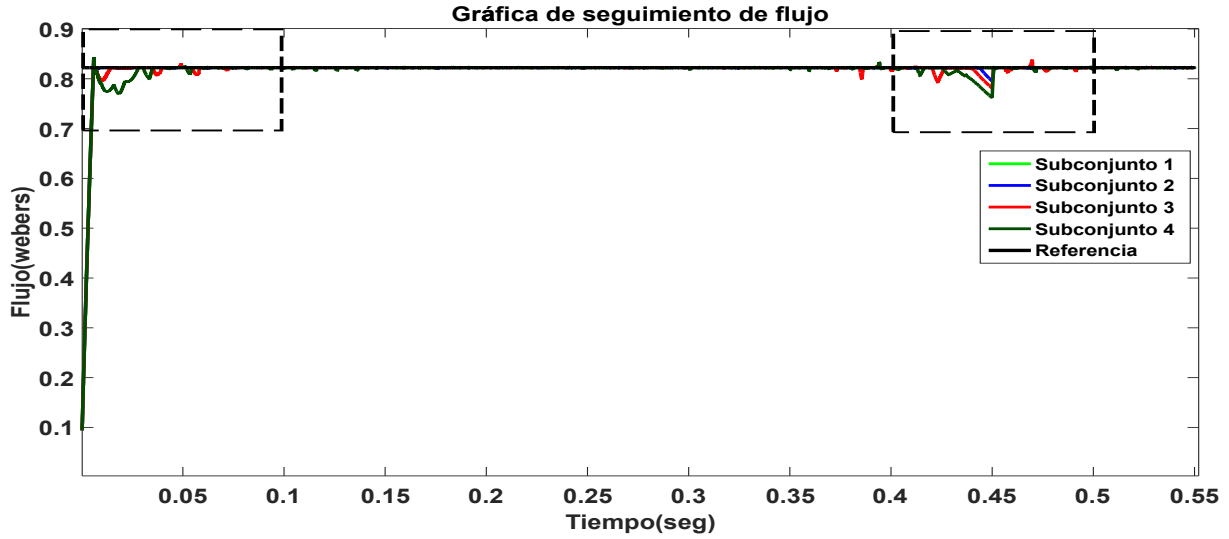


Figura 4.40: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.

En la tabla 4.16 se muestran los errores RMS del flujo y los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados que se presentan en la tabla 4.16 son tomados en diferentes intervalos de tiempo con el objetivo de ver la diferencia con las pruebas anteriores.

Se observa en la tabla que el mayor error en el flujo se presentó en los subconjuntos 3 y 4 en los intervalos de $t = 0.02 - 0.1s$ y $t = 0.4 - 0.5s$. Por otro lado, se observa que al tener un factor de peso para tomar prioridad en el flujo del estator disminuye los errores RMS del flujo después del transitorio, esta disminución se presentó en el intervalo $t = 0.1 - 0.3s$ para el sistema que evaluó los subconjuntos 3 y 4.

Resultados								
Subconjunto de vectores	Error RMS del flujo con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del flujo con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de cálculo
	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s	t=0.4-0.5s	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s	t=0.4-0.5s		
Subconjunto 1	0.0017	0.0018	0.018	0.0008	0.0008	0.0008	125	Base
Subconjunto 2	0.0018	0.0018	0.018	0.0009	0.0008	0.0008	22	82.4%
Subconjunto 3	0.0035	0.0015	0.0047	0.0036	0.0007	0.0070	16	87.2%
Subconjunto 4	0.0087	0.0015	0.0058	0.0088	0.0007	0.0088	12	90.4%

Tabla 4.16: Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 3.

Tensiones en el estator V_s

En la figura 4.41 y 4.42 se muestra las tensiones de salida del inversor evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. En ambas figuras se observa que al disminuir la velocidad del rotor el inversor entrega niveles de tensión bajos y conforme aumentar la velocidad angular el inversor entrega mayores niveles de tensión. En los recuadros marcados en ambas figuras se puede ver el comportamiento de las tensiones antes del cambio de par en bajas velocidades.

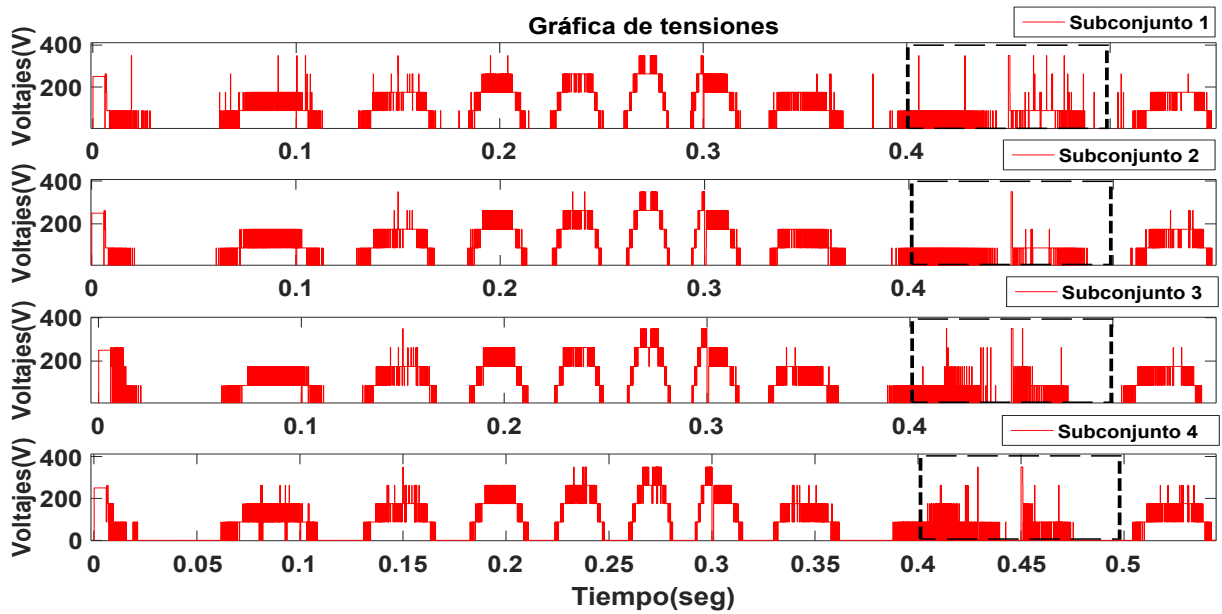


Figura 4.41: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 3.

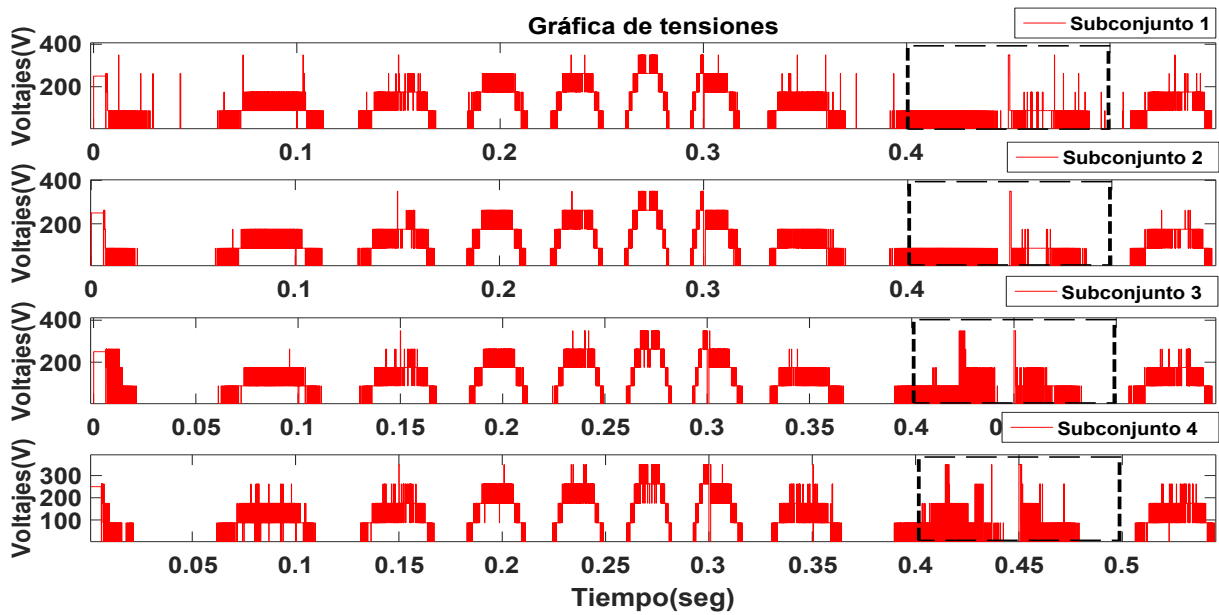


Figura 4.42: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 3.

En la tabla 4.17 se muestra el total de vectores a evaluar y su reducción en %; los resultados se comparan con el subconjunto 1. Se observa que al reducir el ángulo del subconjunto menores son los vectores a evaluar como se muestra en el subconjunto 4 que tiene una reducción del 90.4%.

Resultados			
Subconjunto	Número de vectores a evaluar	Reducción en operaciones	Reducción
Subconjunto 1	125	Base	Base
Subconjunto 2	22	103	82.4%
Subconjunto 3	16	109	87.2%
Subconjunto 4	12	113	90.4%

Tabla 4.17: Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 3.

En la tabla 4.18 se muestra el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión para cada subconjunto. Los resultados muestran que al dar más prioridad al flujo del estator en la función de costo implica que tengan más saltos de nivel, esto se presentó en el sistema que evaluaba los subconjuntos 3 y 4.

Subconjunto	Resultados											
	Tiempo de muestreo de $= T_s = 100\mu s$						Tiempo de muestreo de $= T_s = 50\mu s$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
subconjunto 1	1007	1067	1102	45	49	43	2012	2076	2223	59	70	55
subconjunto 2	951	1061	1050	21	34	17	1915	2152	2113	40	76	36
subconjunto 3	961	1098	1064	51	126	47	1869	2188	2124	107	257	87
subconjunto 4	991	1147	1079	80	179	114	1958	2292	2168	140	398	236

Tabla 4.18: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 3.

Corrientes en el estator i_{as}, i_{bs}, i_{cs}

En las figuras 4.43-4.46, se muestran las corrientes de fase, integrando un factor de peso en la función de costo y con flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

Primeramente se muestra que al integrar un factor de peso en la función de costo para dar prioridad al flujo mejora la distorsión en las corrientes, también se muestra en los recuadros de las figuras 4.45 y 4.46 que la distorsión se presentó en dos intervalos de tiempo la primera distorsión se presentó en $t = 0.02 - 0.1s$ y la segunda se presentó en el intervalo de $t = 0.4 - 0.5s$ en ambos intervalos la velocidad angular se encontraba por debajo de 400 RPM, estas distorsiones se presentaron para el sistema que evalúa los subconjuntos 3 y 4.

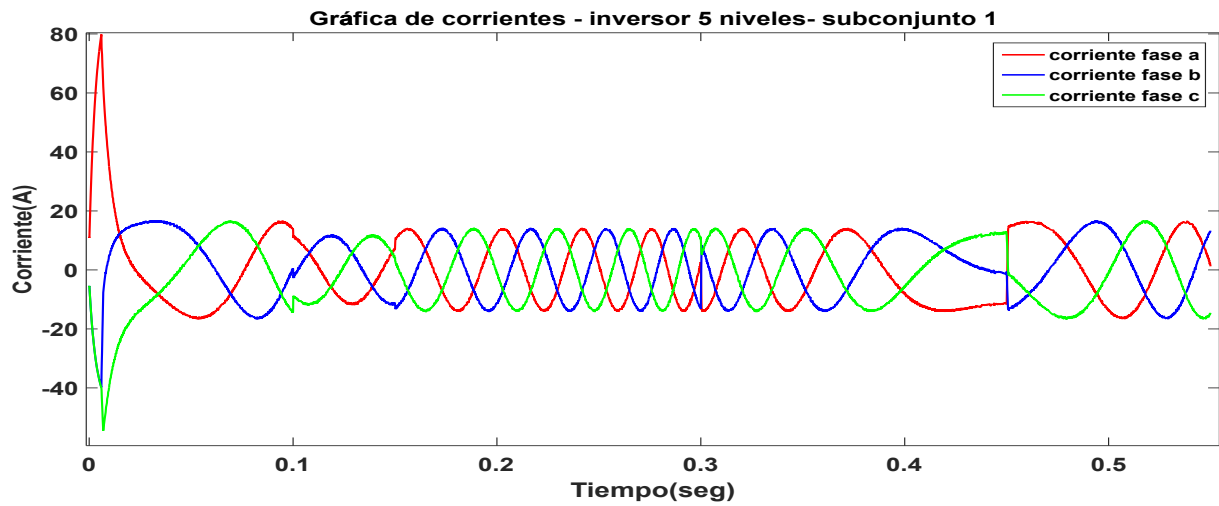


Figura 4.43: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.

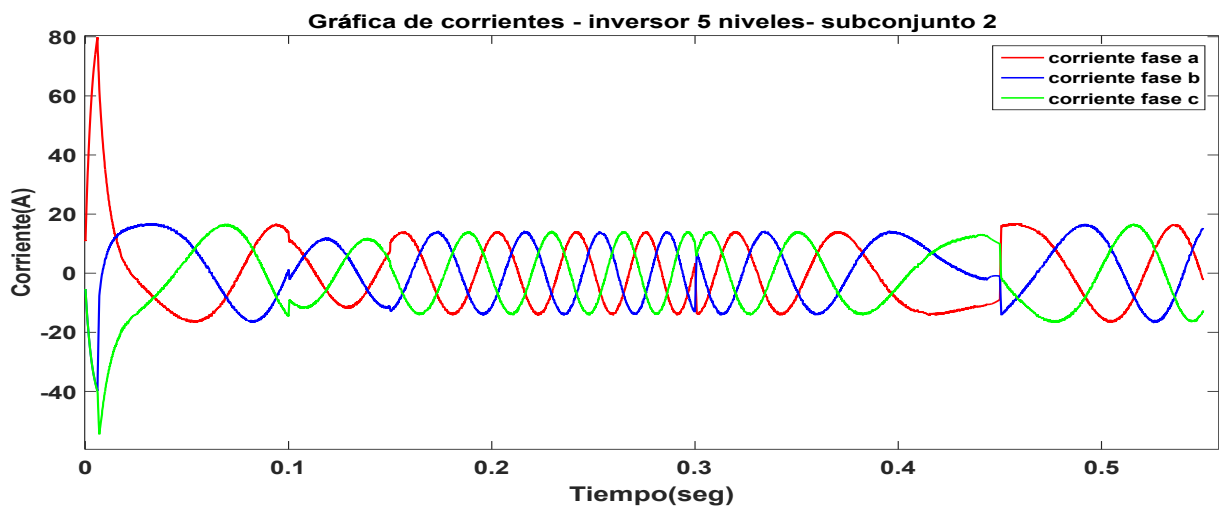


Figura 4.44: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 3.

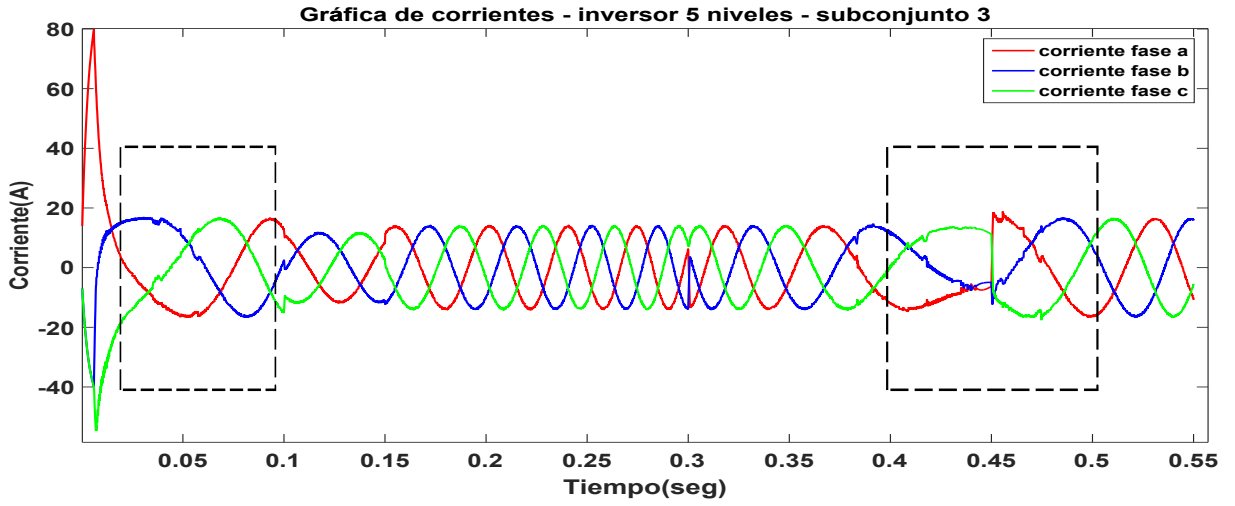


Figura 4.45: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.

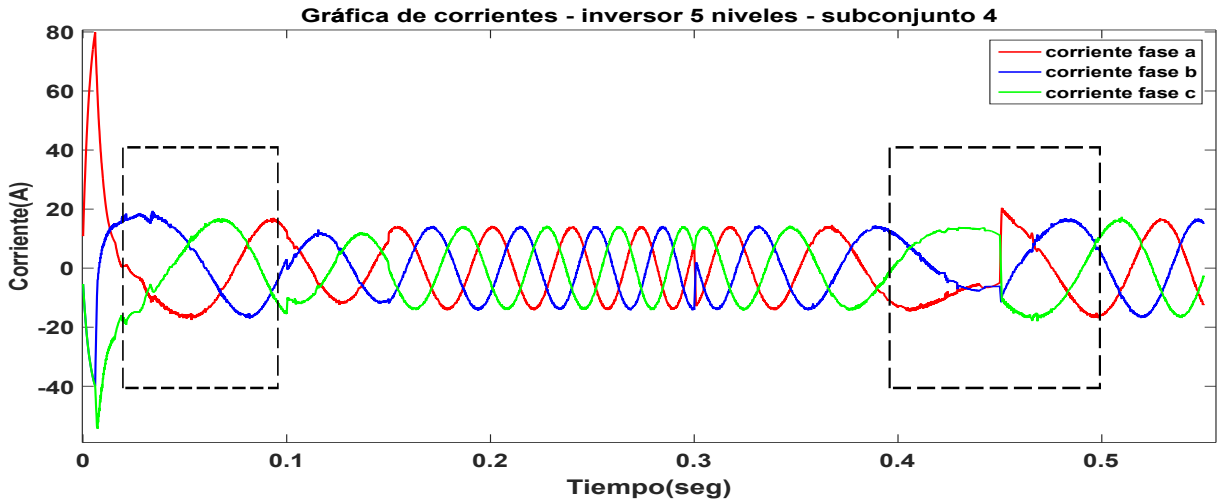


Figura 4.46: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.

En las figuras 4.47-4.50, se muestran las corrientes de fase, integrando un factor de peso en la función de costo y con flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

Se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo, el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta una menor distorsión en las corrientes. En los recuadros de las figuras 4.49 y 4.50 se observa que la primera distorsión se presentó en $t = 0.02 - 0.1s$ y la segunda se presentó en el intervalo de $t = 0.4 - 0.5s$ estas variaciones se presentador para el sistema que evalúa el subconjuntos 3 y 4.

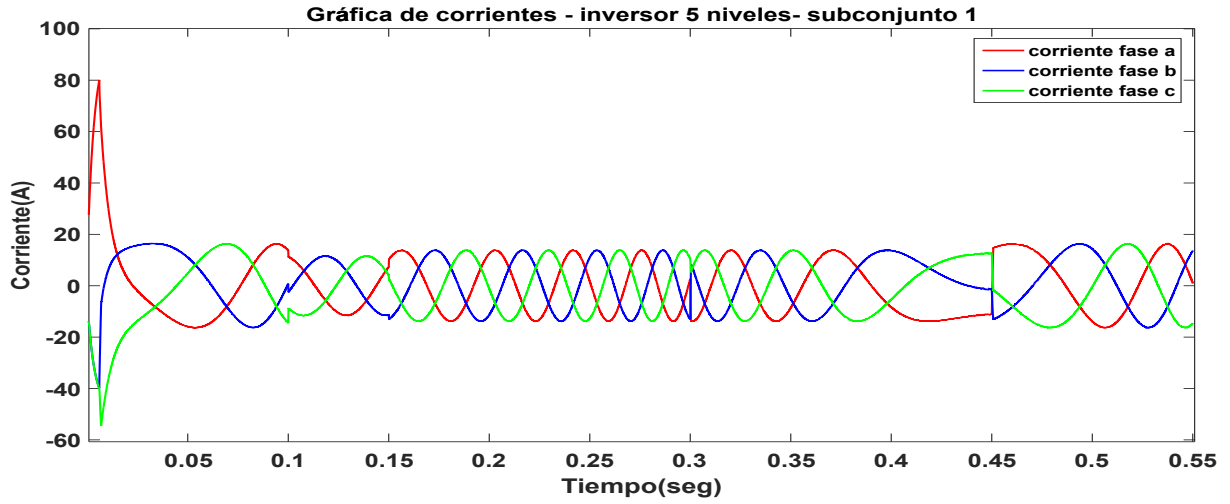


Figura 4.47: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

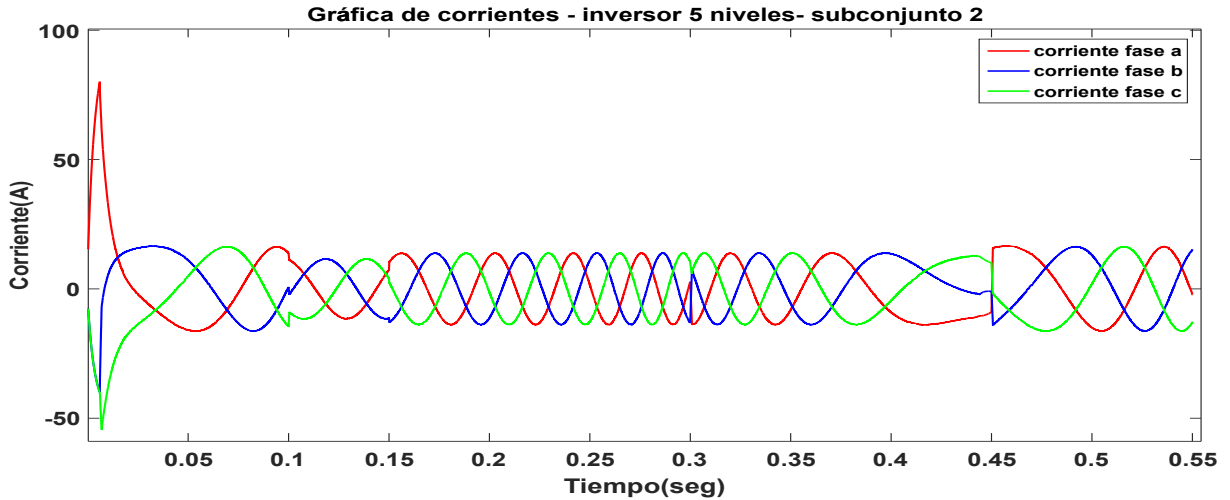


Figura 4.48: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 3.

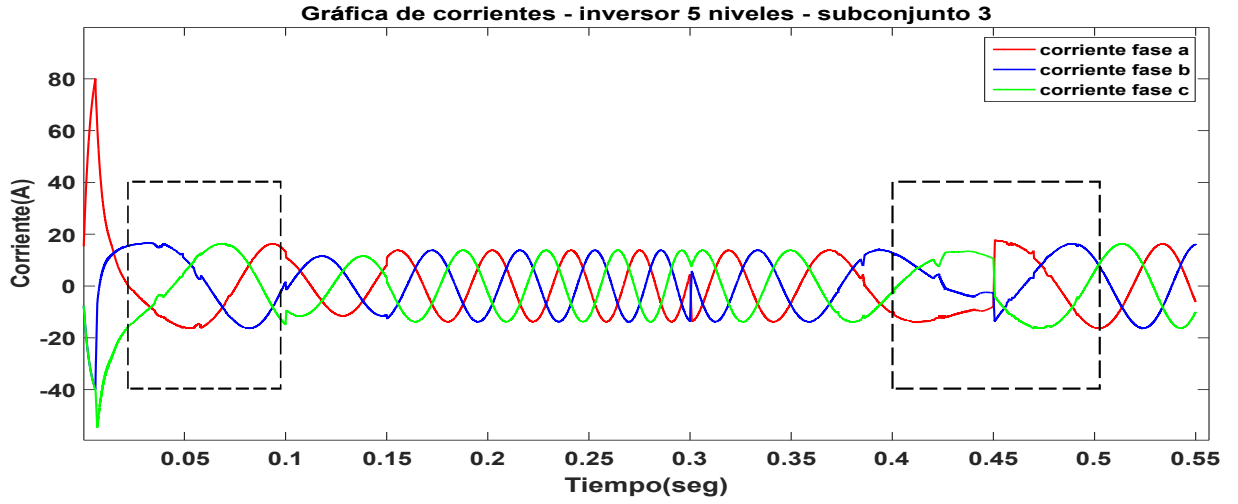


Figura 4.49: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.

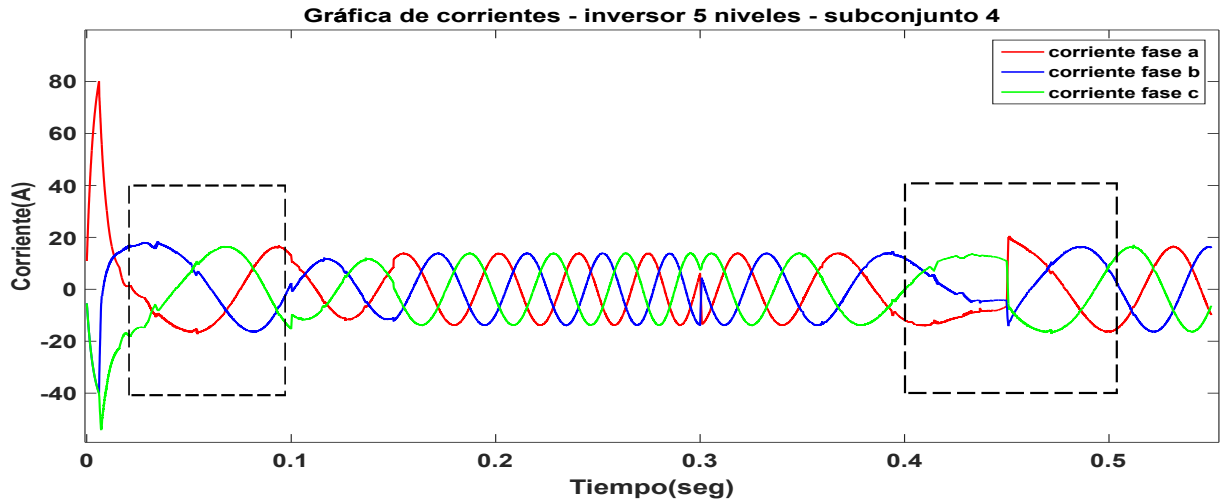


Figura 4.50: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 3.

En la tabla 4.19 se presenta el valor del rizo de las corrientes del estator evaluando diferentes subconjuntos con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran que al dar más prioridad al flujo del estator en el subconjunto 3 y 4 aumenta el valor máximo del rizo en ciertos intervalos de tiempo. Para el subconjunto 3 y 4 se puede observar que los valores más altos en los rizos de la corriente se presentaron en los intervalos de $t = 0.02 - 0.1s$ y $t = 0.4 - 0.5s$,

sin embargo, en el intervalo $t = 0.1 - 0.3s$ el subconjunto 3 y 4 presentó menor magnitud en el rizo de las corrientes con respecto a los demás subconjuntos.

Resultados						
Subconjunto	Tiempo de muestreo = $100\mu s$			Tiempo de muestreo = $50\mu s$		
	Rizo máximo			Rizo máximo		
	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s	t=0.4-0.5s	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.3s	t=0.4-0.5s
subconjunto 1	1.09 A	1.22 A	1.11 A	0.59 A	0.68 A	0.65 A
subconjunto 2	1.24 A	1.23 A	1.20 A	0.61 A	0.66 A	0.64 A
subconjunto 3	1.69 A	1.17 A	1.70 A	1.34 A	0.63 A	1.40 A
subconjunto 4	1.61 A	1.13 A	1.76 A	1.30 A	0.58 A	1.35 A

Tabla 4.19: Valor del rizo máximo en las corrientes evaluando diferentes subconjuntos- Prueba 3.

4.3.4. Prueba 4.-Inversión de sentido de giro

En esta cuarta prueba, consiste en un cambio de inversión del sentido de giro. Primero se lleva el motor a un flujo nominal de 0.8 webers en un intervalo de tiempo de $t = 0 - 0.005s$. Posteriormente se inicia con un par de referencia de 60 N-m en $t = 0.005s$, después en $t = 0.2$ la referencia de par se cambia a -80 N-m, esto frenará al motor e invertirá el sentido de giro. En esta prueba también se utilizará el método de reducción de cálculos junto con la integración del factor de peso en la función de costo, pero a diferencia de las pruebas anteriores en esta ocasión se evaluarán dos subconjuntos de vectores además para poder lograr el cambio de giro, para asignar los dos subconjuntos de vectores a evaluar definimos la siguiente ecuación:

$$\vec{V}_{si}^{opt} = \left\{ \vec{V}_{si} = (|v_{qd0}|, \forall \theta_i) \mid \theta_i \in \left[\theta_{\vec{\psi}_s} + \theta_1, \theta_{\vec{\psi}_s} + \theta_2 \cup \theta_{\vec{\psi}_s} + \theta_3, \theta_{\vec{\psi}_s} + \theta_4 \right] \right\} \quad (4.6)$$

Los valores de los ángulos de los subconjuntos y el valor del factor de peso están descritos en la tabla 4.20. La prueba se realizará con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$

Subconjunto de vectores	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Valor del factor de peso
subconjunto 1	0°	360°	na	na	na
subconjunto 2	30°	150°	210°	330°	na
subconjunto 3	60°	120°	240°	300°	2
subconjunto 4	70°	110°	250°	290°	2.5

Tabla 4.20: Definición de valores en los ángulos de cada subconjunto- Prueba 4.

Al disminuir la velocidad angular antes de invertir el giro del motor los vectores que están en θ_1 y θ_2 son requeridos con menos frecuencia, por lo tanto se necesita utilizar otro subconjunto de vectores que estén opuestos 180° al subconjunto definido inicialmente, entonces el segundo subconjunto se define en el rango de θ_3 y θ_4 para que sean utilizados cuando la velocidad angular es negativa. Cabe mencionar que no se puede poner una condición, que cuando la velocidad angular es negativa cambiar inmediatamente al otro subconjunto ya que el sistema aun requiere vectores del otro subconjunto en bajas velocidades para poder invertir el giro, por lo cual el sistema requiere evaluar dos subconjuntos a la vez.

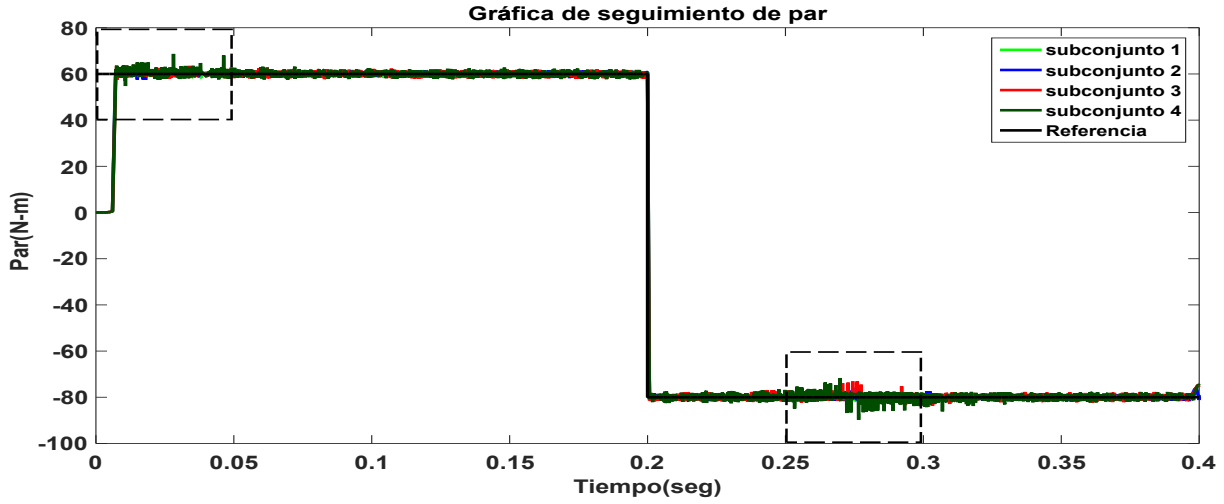
Par T_e -Velocidad ω_r

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a la prueba IV aplicando el método de reducción de cálculos. El sistema tomando el subconjunto 1 se muestra con una traza de color verde claro, el subconjunto 2 se muestra de color azul, el subconjunto 3 se muestra de color rojo, el subconjunto 4 se muestra en verde oscuro siguiendo la referencia mostrada en color negro.

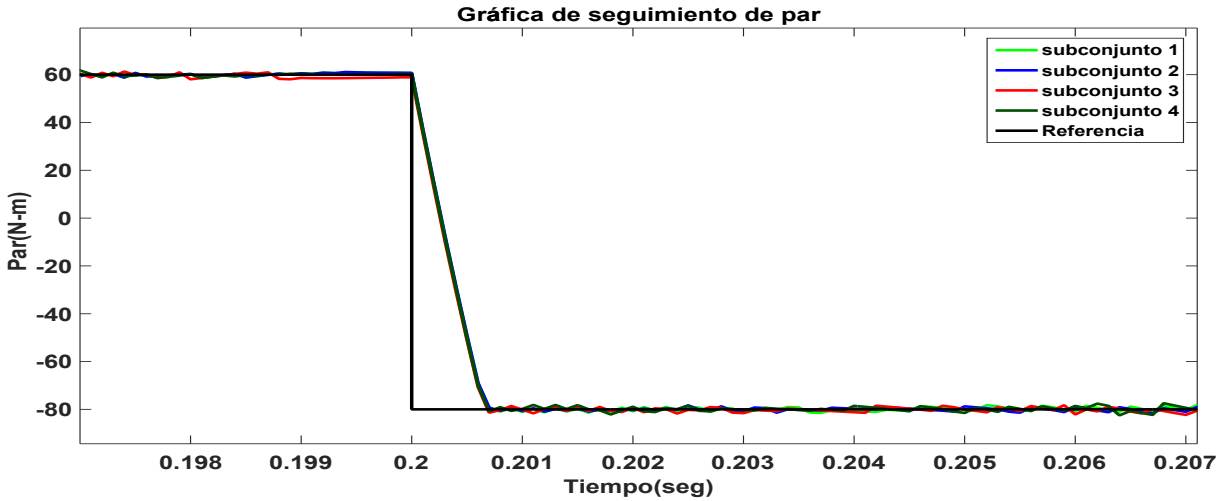
En la figura 4.51 se muestra el seguimiento del par de la máquina de inducción aplicando un control FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores, integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se observa en la figura 4.51(a) que el sistema sigue correctamente la referencia de par a pesar del cambio de signo en el tiempo $t = 0.2s$. También se muestra que sin importar que se evalúen diferentes subconjuntos de vectores y al igual que en la prueba II al tener la máquina de inducción con flujo nominal en el estator desde un inicio antes de un cambio de par ayuda a reducir el sobre impulso inicial presente cuando el sistema parte de cero a una referencia.

Se observa que al tener un factor de peso para dar prioridad al flujo del estator tiene cierta implicación en el par, ya que se muestra cierta distorsión en el seguimiento. En los recuadros marcados en la figura 4.51(a) se señala donde se presentó mayor error en el par, el primero se tiene en el intervalo de $t = 0 - 0.05s$ y el segundo se muestra en el intervalo de $t = 0.25 - 0.3s$ en ambos intervalos la velocidad angular se encontraba por debajo de los 400 RPM.

En la figura 4.51(b) se muestra el detalle cuando el sistema tiene una referencia de par negativa en el tiempo $t = 0.2s$. El sistema tarda en converger a la referencia $0.0005s$ para todos los diferentes subconjuntos de vectores evaluados.



(a) Seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.

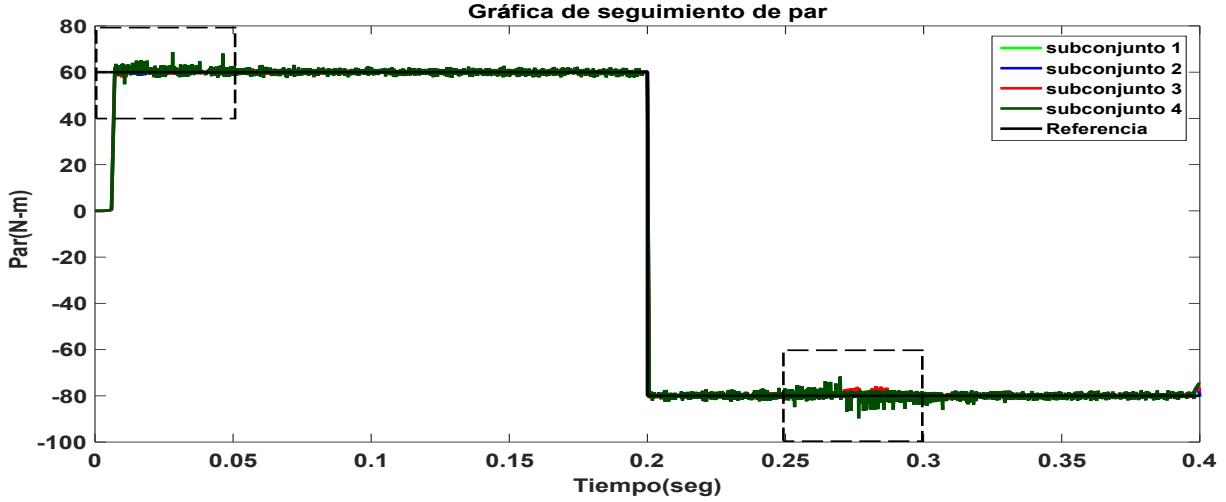


(b) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.

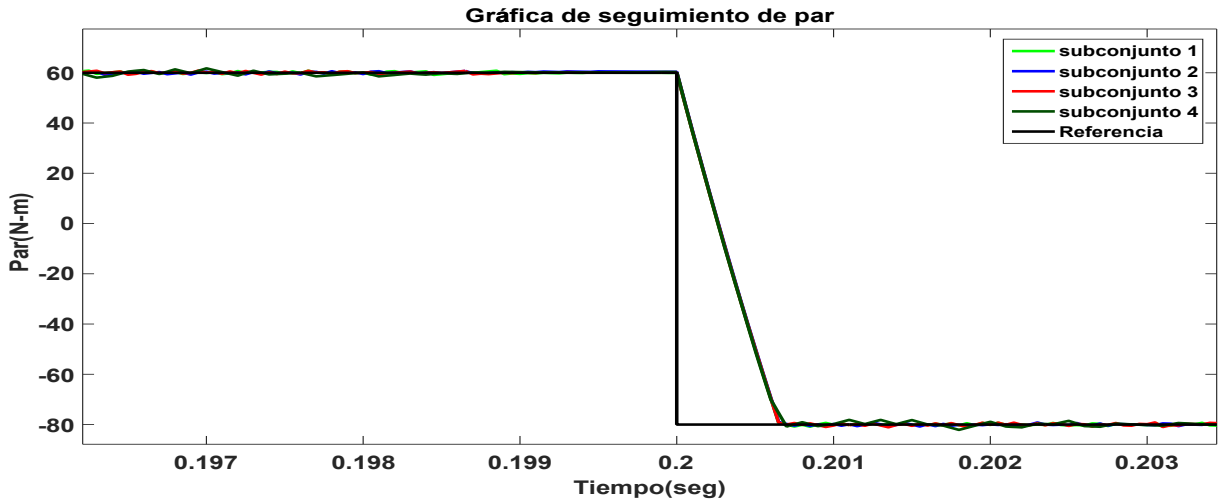
Figura 4.51: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.

En la figura 4.52 se muestra el seguimiento del par con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En la figura 4.52(a) se aprecia que el sistema sigue correctamente la referencia del par evaluando diferentes subconjuntos de vectores. En los recuadros marcados en la figura 4.52(a) se señala donde se presentó mayor error en el seguimiento, al igual que en la simulación anterior estos problemas se presentaron en los intervalos $t = 0 - 0.05s$ y $t = 0.25 - 0.35s$, sin embargo se puede observar que al disminuir el tiempo de muestreo el error disminuye.

En la figura 4.52(b) se muestra que al disminuir el tiempo de muestreo a $T_s = 50\mu s$ no afecta en el transitorio del sistema ya que ambos sistemas de esta misma prueba al cambio del signo del par en el $t = 0.2s$ convergen a la referencia en un tiempo menor a $0.0005s$.



(a) Seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.



(b) Detalle en el seguimiento de par con diferentes subconjuntos de vectores de tensión.

Figura 4.52: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.

En la tabla 4.21 se muestran los errores RMS del par y los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de mues-

treo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran que a pesar de evaluar dos subconjuntos de vectores el máximo porcentaje de reducción que se logra es del 80 %.

Resultados								
Subconjunto de vectores	Error RMS del par con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del par con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de cálculo
	t=0.02-0.1	t=0.2-0.3	t=0.4-0.5	t=0.02-0.1	t=0.2-0.3	t=0.4-0.5		
Subconjunto 1	0.8054	0.8076	0.8609	0.4298	0.4215	0.3986	125	Base
Subconjunto 2	0.8504	0.8211	0.9579	0.4230	0.4134	0.4787	44	64.8 %
Subconjunto 3	0.8544	0.9574	1.4603	0.5930	0.4809	0.8938	32	74.4 %
Subconjunto 4	1.2062	1.0730	1.9272	0.7607	0.5335	0.9685	24	80.8 %

Tabla 4.21: Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 4.

Por otro lado, en la figura 4.53 se muestra la velocidad angular de la máquina integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se observa que la máquina de inducción tiene un comportamiento igual a pesar de evaluar diferentes subconjuntos de vectores de tensión, también se observa que aplicando un par positivo se alcanza una velocidad aproximada de 1000 RPM en un tiempo de $t = 0.2s$ y al invertir el signo del par de referencia, la máquina invierte su giro y su pendiente se hace negativa posteriormente alcanza una velocidad aproximada de -1000 RPM en un tiempo de $t = 0.4s$, este mismo comportamiento se presentó en ambas simulaciones con diferentes tiempos de muestreo.

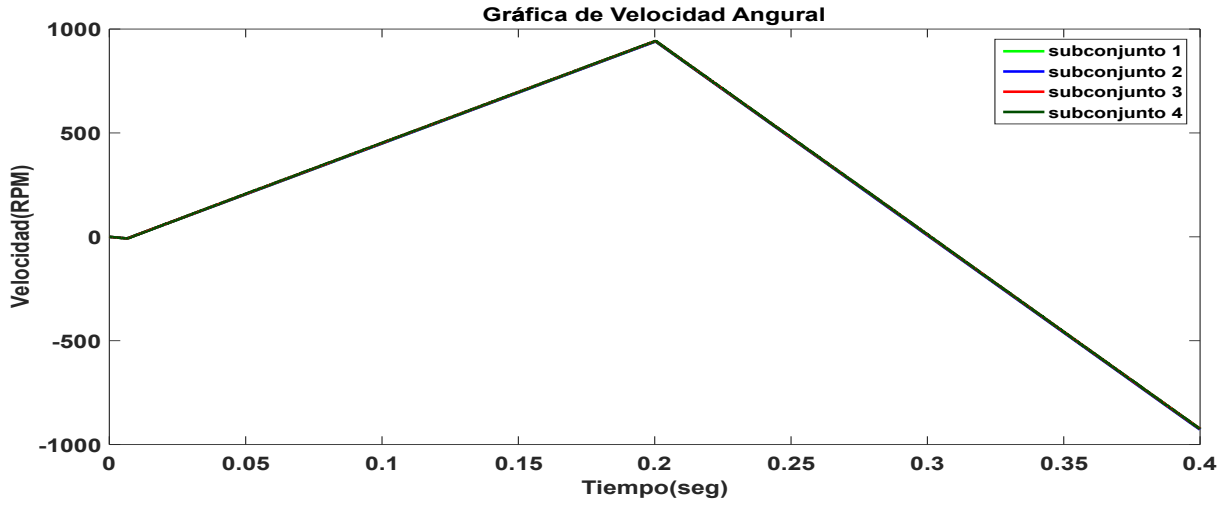


Figura 4.53: Velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$ -Prueba 4.

Flujo en el estator ψ_s

En la figura 4.54 se muestra el flujo del estator integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. En la figura 4.54 se muestra que en el intervalo de $t = 0 - 0.005s$ se lleva el sistema a un flujo nominal antes de demandar un cambio de par, se observa que al integrar un factor de peso en la función de costo para dar más prioridad al flujo evita que se presenten o reduzcan los transitorios a bajas velocidades. Hay que señalar que no se presentaron transitorios en esta prueba por que ahora se evalúan dos subconjuntos a la vez a diferencia de la prueba III.

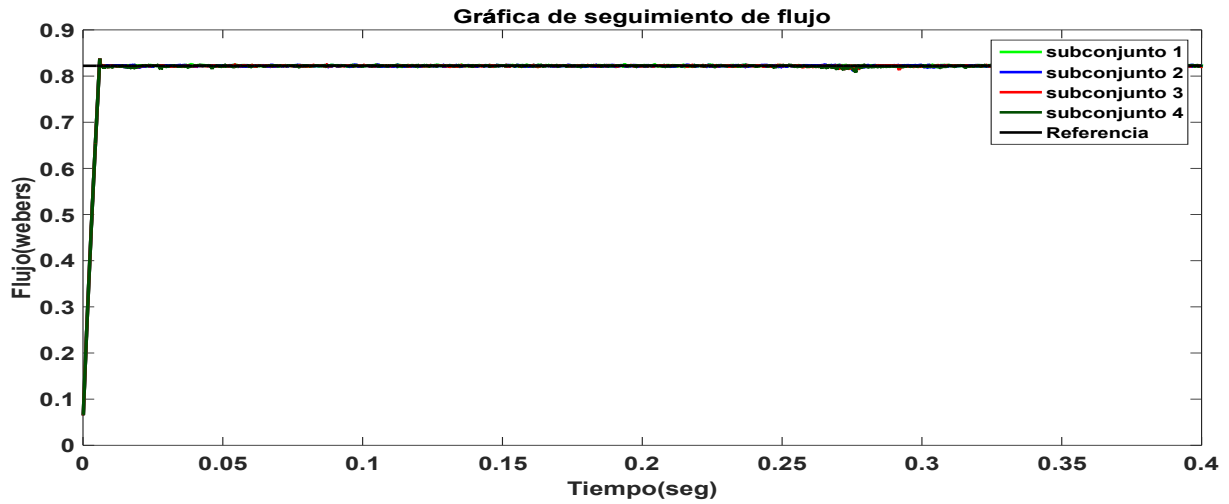


Figura 4.54: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 4.

En la figura 4.55 se muestra el flujo del estator integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Se observa que la disminución del tiempo de muestreo no afecta en el transitorio ya que ambas simulaciones llegan a la referencia del flujo en un tiempo de 0.005s, sin embargo se logra apreciar que al disminuir el tiempo de muestreo el error del flujo disminuye.

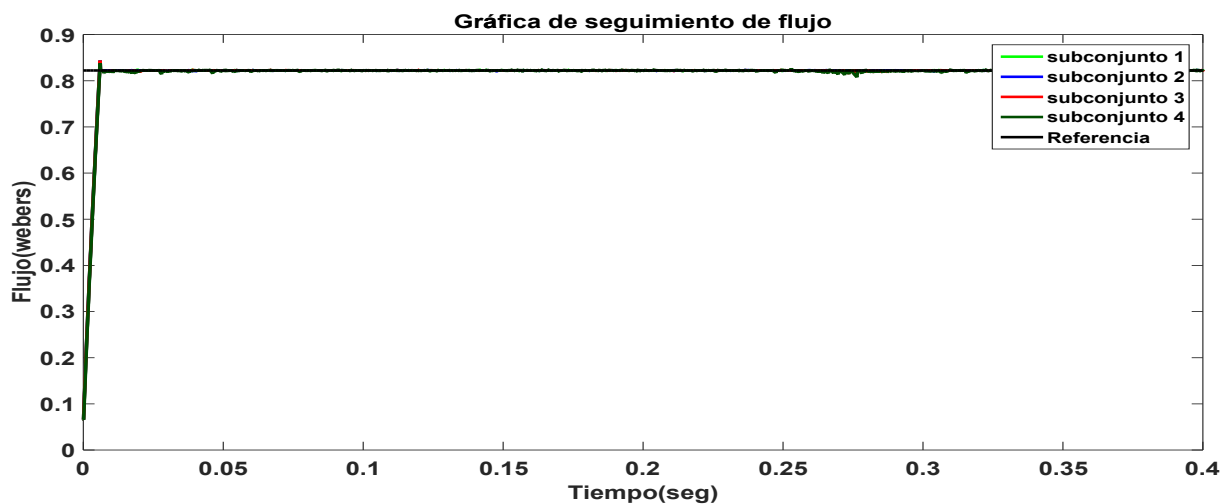


Figura 4.55: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 4.

En la tabla 4.22 se muestran los errores RMS del flujo, también los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempos de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se logra apreciar que evaluando dos subconjuntos de vectores el máximo porcentaje de reducción que se logra es del 80 %. Por otro lado se observa que al integrar un factor de peso en la función de costo para dar más prioridad al flujo disminuye el error que hay entre la referencia del flujo $\vec{\psi}_s^*$ y el flujo del estator $\vec{\psi}_s$. Los resultados muestran que al evaluar dos subconjuntos de vectores el error en el flujo se mantiene constante en cualquier intervalo de tiempo a diferencia de la prueba III.

Resultados								
Subconjunto de vectores	Error RMS del flujo con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del flujo con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de cálculo
	t=0.02-0.1s	t=0.2-0.3s	t=0.4-0.5s	t=0.02-0.1s	t=0.2-0.3s	t=0.4-0.5s		
Subconjunto 1	0.0018	0.0018	0.0018	0.0008	0.0008	0.0008	125	Base
Subconjunto 2	0.0017	0.0018	0.0017	0.0008	0.0008	0.0009	44	64.8 %
Subconjunto 3	0.0015	0.0015	0.0015	0.0008	0.0007	0.0010	32	74.4 %
Subconjunto 4	0.0017	0.0014	0.0017	0.0013	0.0007	0.0010	24	80.8 %

Tabla 4.22: Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 4.

Tensiones en el estator V_s

A Continuación, en la figura 4.56 y 4.57 se muestra las tensiones de salida del inversor evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. En ambas figuras se observa que al disminuir la velocidad del rotor el inversor entrega niveles de tensión bajos y conforme aumentar la velocidad angular el inversor entrega mayores niveles de tensión. En los recuadros marcados en ambas figuras se pueden observar el comportamiento de las tensiones en bajas velocidades antes de realizar el cambio de giro, también se puede observar que los subconjuntos 3 y 4 fueron los que presentaron mayores saltos en más de un nivel de tension en este intervalo.

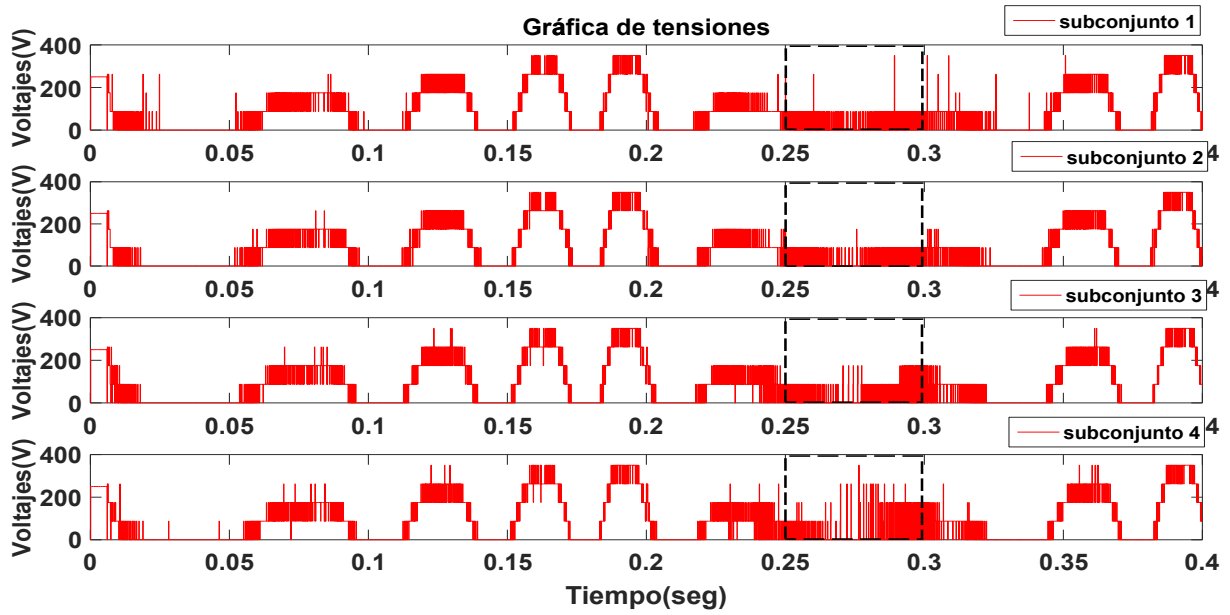


Figura 4.56: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 4.

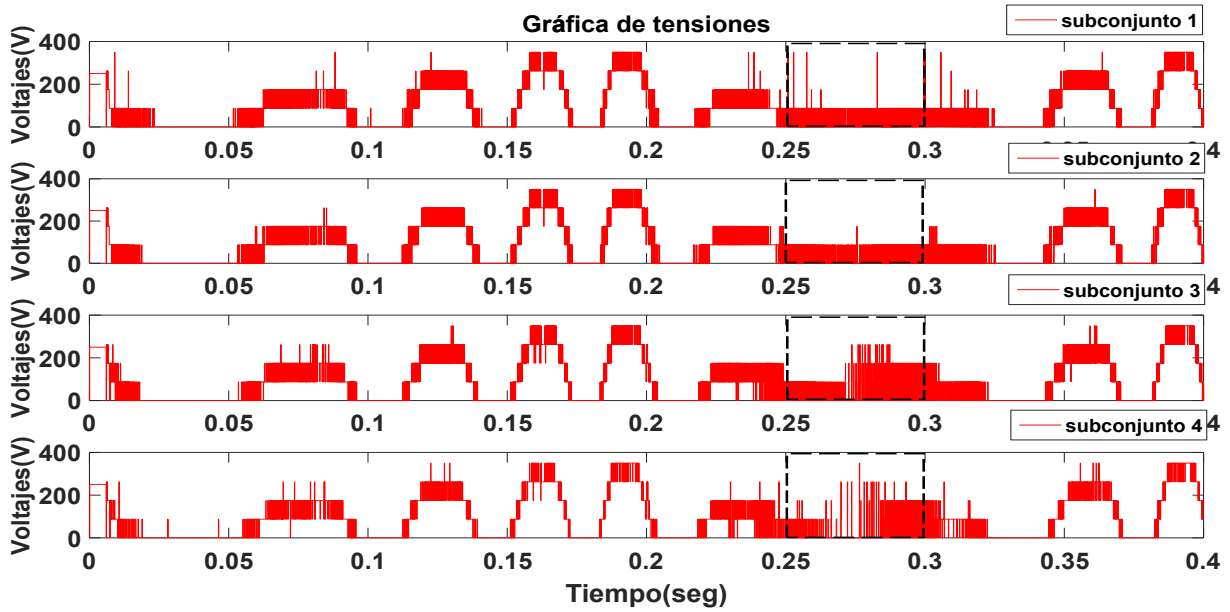


Figura 4.57: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 4.

En la tabla 4.23 se muestra el total de vectores a evaluar y su reducción en %; los resultados

se comparan con el subconjunto 1. los resultados muestran que al evaluar dos subconjuntos de vectores aumenta el número de operaciones, la reducción máxima que se tuvo fue de un 80.8% para el subconjunto 4.

Resultados			
Subconjunto	Número de vectores a evaluar	Reducción en operaciones	Reducción
Subconjunto 1	125	Base	Base
Subconjunto 2	44	81	64.8%
Subconjunto 3	32	93	74.4%
Subconjunto 4	24	101	80.8%

Tabla 4.23: Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 4.

En la tabla 4.24 se muestra el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión para cada subconjunto. Los resultados muestran que al dar más prioridad al flujo del estator en la función de costo implica que tengan más saltos de nivel, esto se presentó en el sistema que evaluaba los subconjuntos 3 y 4.

Resultados												
Subconjunto	Tiempo de muestreo de $=T_s = 100\mu s$						Tiempo de muestreo de $=T_s = 50\mu s$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
subconjunto 1	1529	1240	1371	49	66	57	3025	2419	2785	100	104	89
subconjunto 2	1488	1224	1329	57	43	20	2929	2460	2678	72	113	50
subconjunto 3	1488	1361	1394	124	222	69	2994	2768	2913	318	433	139
subconjunto 4	1478	1461	1499	259	272	145	2699	2504	2623	396	438	206

Tabla 4.24: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 4.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 4.58-4.61, se muestran las corrientes de fase, integrando un factor de peso en la función de costo y con flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase a se muestran en color rojo, para la fase b en color azul y para la fase c en color verde.

Primeramente se muestra que al cambio de signo de par en $t = 0.2s$ y al cambiar el signo de giro en $t = 0.3s$ las fases en el estator cambian de secuencia colocando primero la fase c después la fase b y al último la fase a . Por otro lado, se observa que, al evaluar diferentes subconjuntos de vectores, la distorsión de las corrientes aumenta. En el recuadro marcado en la figura 4.60 y 4.61 se muestra la mayor distorsión en las corrientes del sistema, este problema se presentó en el intervalo de tiempo de $t = 0.25 - 0.3s$ para el sistema que evalúa los subconjuntos 3 y 4. Al igual que en las pruebas anteriores tener la máquina de inducción con flujo en el estator antes de un cambio de par, y un factor de peso ayuda en el transitorio de las corrientes.

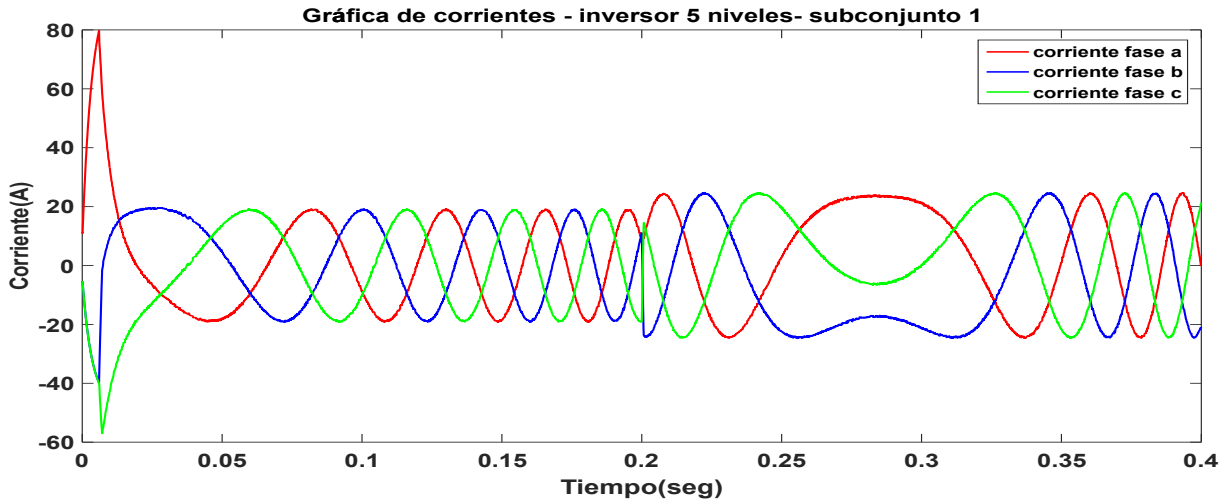


Figura 4.58: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 4.

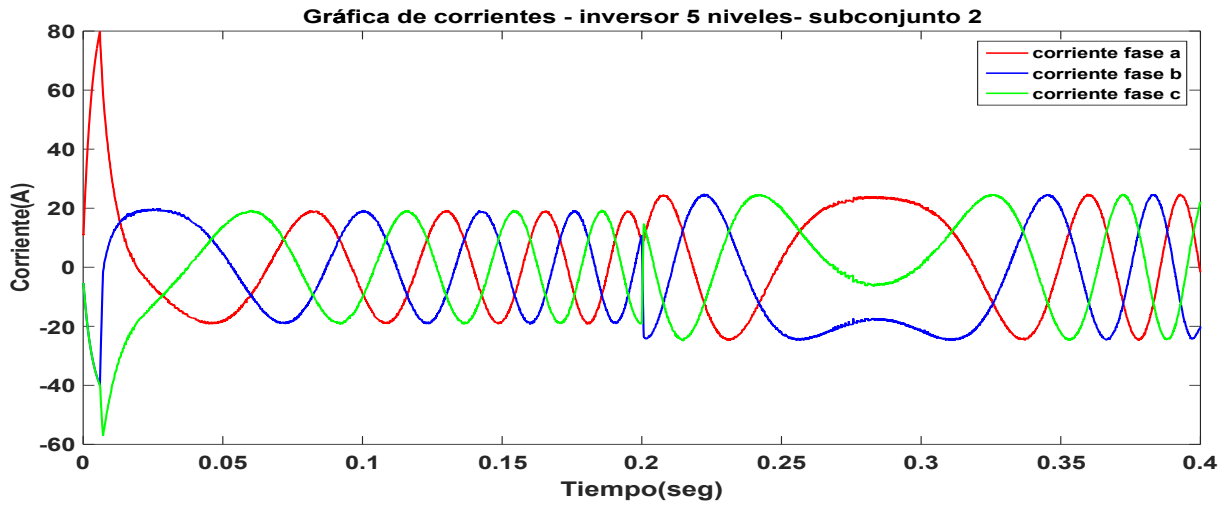


Figura 4.59: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 4.

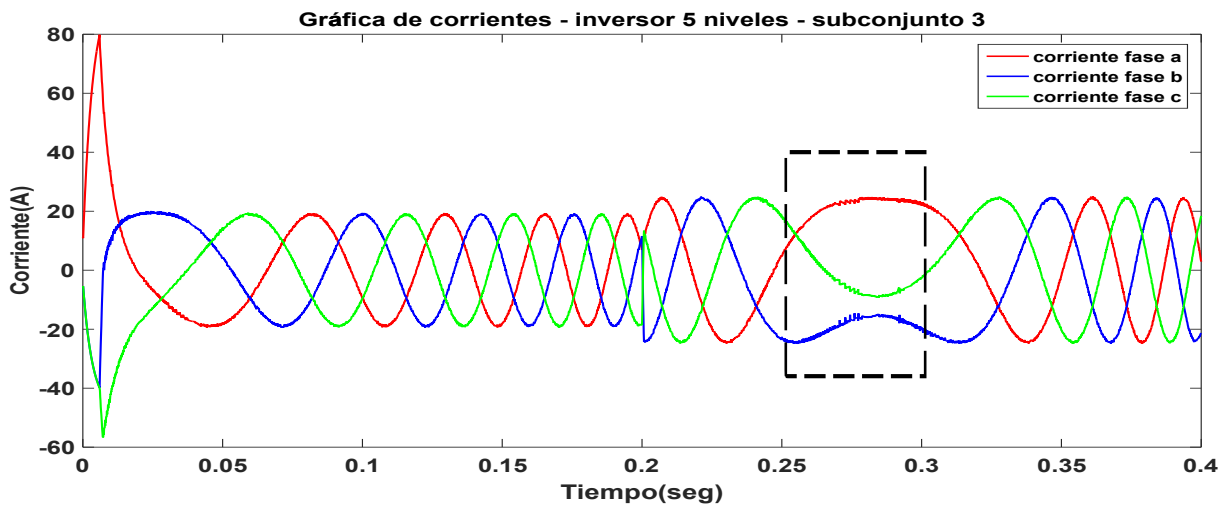


Figura 4.60: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.

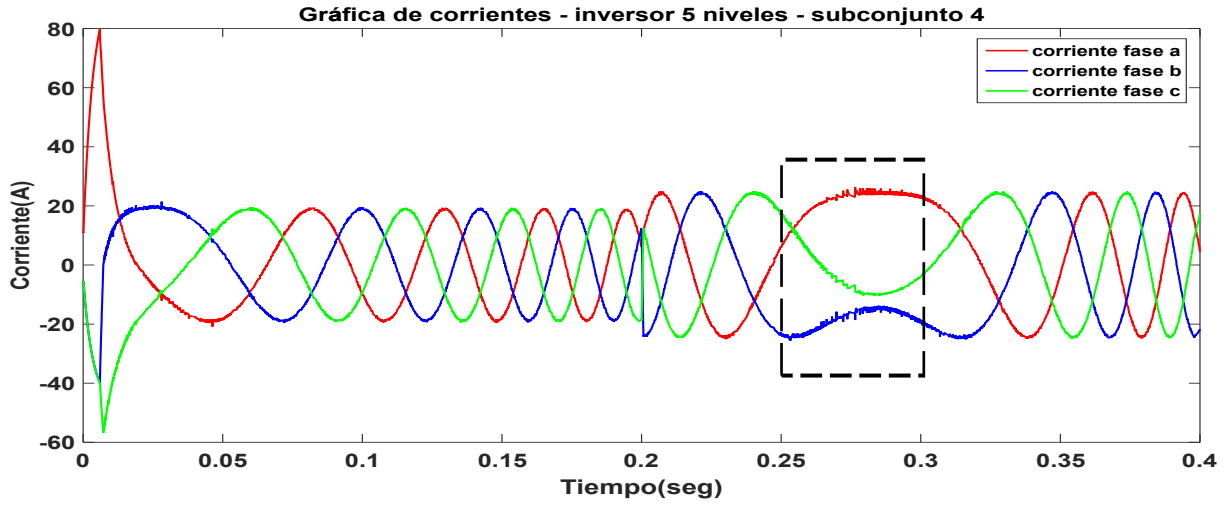


Figura 4.61: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.

En las figuras 4.62-4.65, se muestran las corrientes de fase usando un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

Se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo, el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta una menor distorsión en las corrientes después del transitorio.

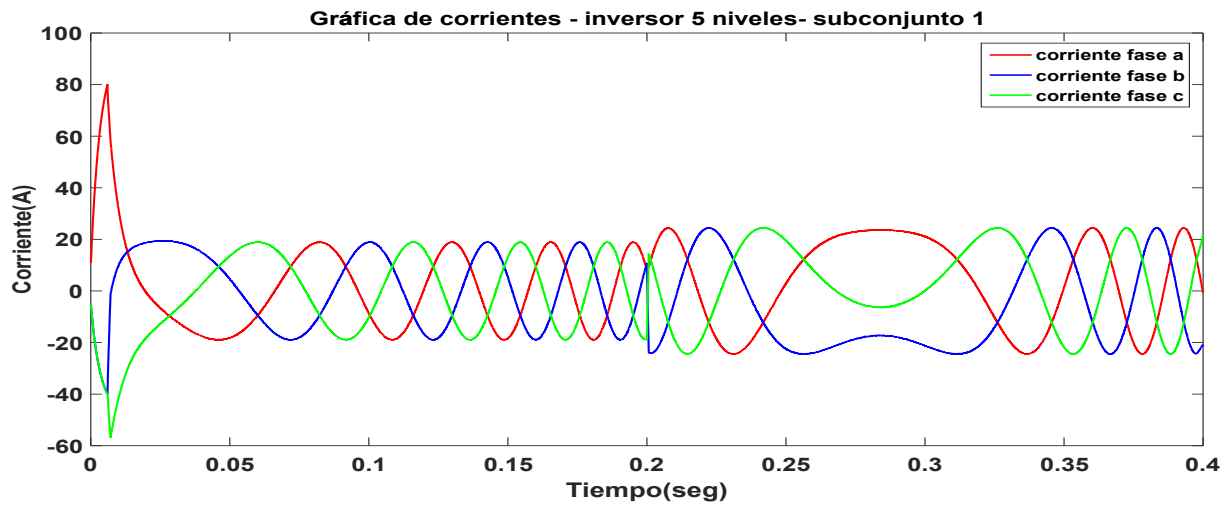


Figura 4.62: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 4.

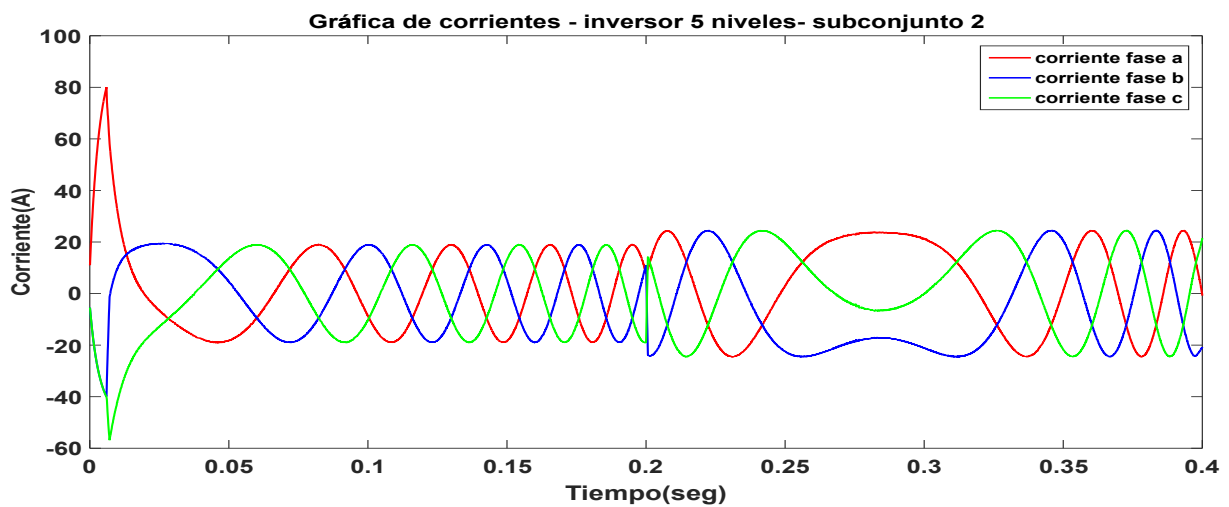


Figura 4.63: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 4.

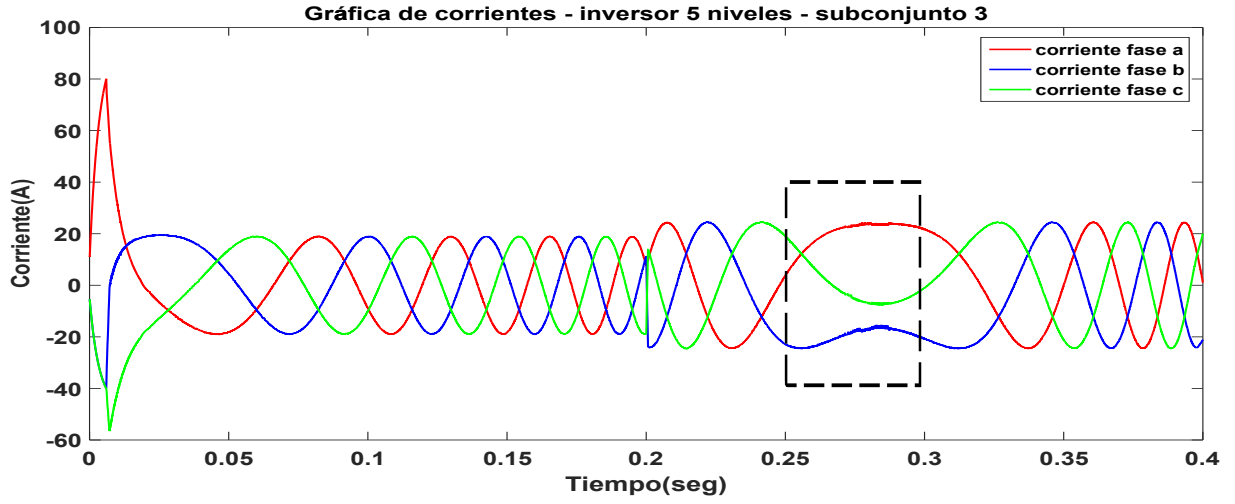


Figura 4.64: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.

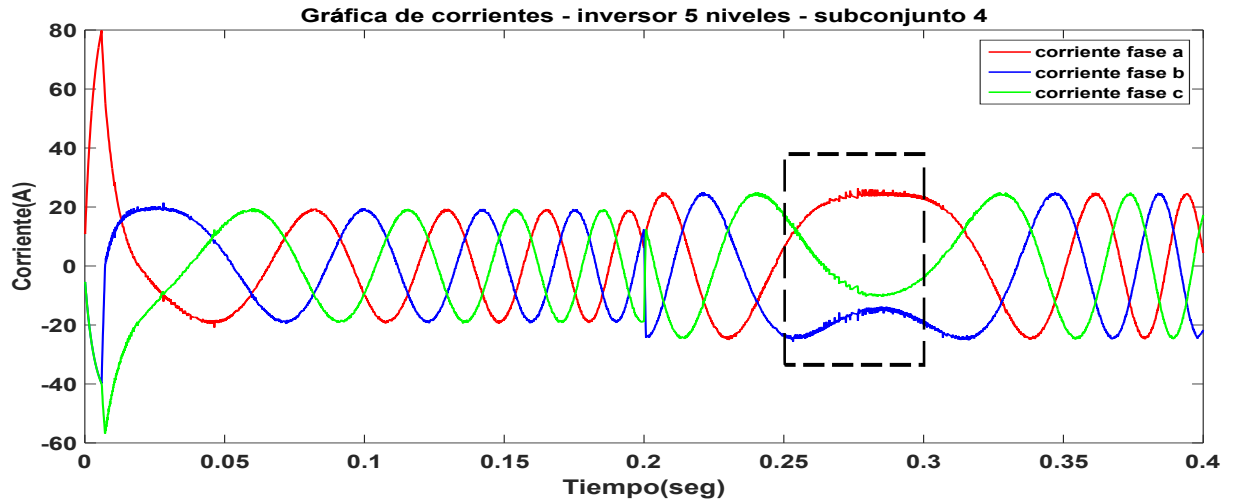


Figura 4.65: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 4.

En la tabla 4.25 se presenta el valor del rizo de las corrientes del estator evaluando diferentes subconjuntos con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran que al evaluar el subconjunto 3 y 4 los valores más altos en los rizos de la corriente se presentaron en el intervalo $t = 0.25 - 0.35s$ durante este tiempo el sistema estaba realizando el cambio de giro, sin embargo, los intervalos $t = 0.02 - 0.1s$ y $t = 0.1 - 0.2s$ el subconjunto 3 y 4 presento menor

magnitud en el rizo de las corrientes con respecto a los demás subconjuntos.

Subconjunto de vectores	Resultados					
	Tiempo de muestreo =100 μ s			Tiempo de muestreo =500 μ s		
	Rizo máximo			Rizo máximo		
	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.2s	t=0.25-0.35s	t=0.02-0.1s	t=0.1-0.2s	t=0.25-0.35s
subconjunto 1	1.41 A	1.36 A	1.32 A	0.65 A	0.74 A	0.65 A
subconjunto 2	1.35 A	1.40 A	1.27 A	0.62 A	0.77 A	0.65 A
subconjunto 3	1.15 A	1.25 A	1.51 A	0.60 A	0.73 A	1.21 A
subconjunto 4	1.28 A	1.32 A	3.35 A	1.20 A	071 A	1.68 A

Tabla 4.25: Valor del rizo máximo en las corrientes evaluando diferentes subconjuntos - Prueba 4.

4.3.5. Prueba 5.- Tren de Velocidad

En esta prueba, las estrategias de control FCS-MPC serán evaluadas junto con un lazo de control de velocidad de tipo PI, donde la velocidad de referencia será cambiada de forma escalonada. En la figura 3.33 se muestra el diagrama de control para esta prueba. Primero se lleva el motor a un flujo nominal de 0.8 webers en el intervalo de tiempo de $t = 0 - 0.005s$. Posteriormente se demandará una secuencia de velocidad de 100 - 400 - 1000 - -1000 RPM, con un intervalo de 0 - 0.5 - 1 - 1.5 s entre cada cambio de magnitud, manteniendo una referencia de flujo de 0.8 webers, el tiempo de simulación será de 2.5 segundos. Al igual que en la prueba anterior se evaluarán dos subconjuntos de vectores alavés tomando en cuenta la ec. (4.6) esto es necesario para lograr el cambio de giro y también se integrará el factor de peso en la función de costo. Los valores de la función de peso y los subconjuntos están dados por la tabla 4.20. Las pruebas se realizaron con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. La constante proporcional e integral son $K_p = 5$ y $K_i = 1$ la sintonización fue realizada heurísticamente. Además, el sistema posee un par de carga de $T_L = 11.9Nm$.

Par T_e -Velocidad ω_r

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a la prueba V aplicando el método de reducción de cálculos. El sistema tomando el subconjunto 1 se muestra con una traza de color verde claro, el subconjunto 2 se muestra de color azul, el subconjunto 3 se muestra de color rojo, el subconjunto 4 se muestra en verde oscuro siguiendo la referencia mostrada en color negro.

En la figura 4.66 se muestra el seguimiento de velocidad angular, integrando un factor de peso en la función de costo y flujo nominal antes de un cambio de referencia de par con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se observa un correcto seguimiento entre la referencia de velocidad ω_r^* y la velocidad medida ω_r . También se puede apreciar que independientemente de los subconjuntos que se evalúen el comportamiento en la velocidad es el mismo.

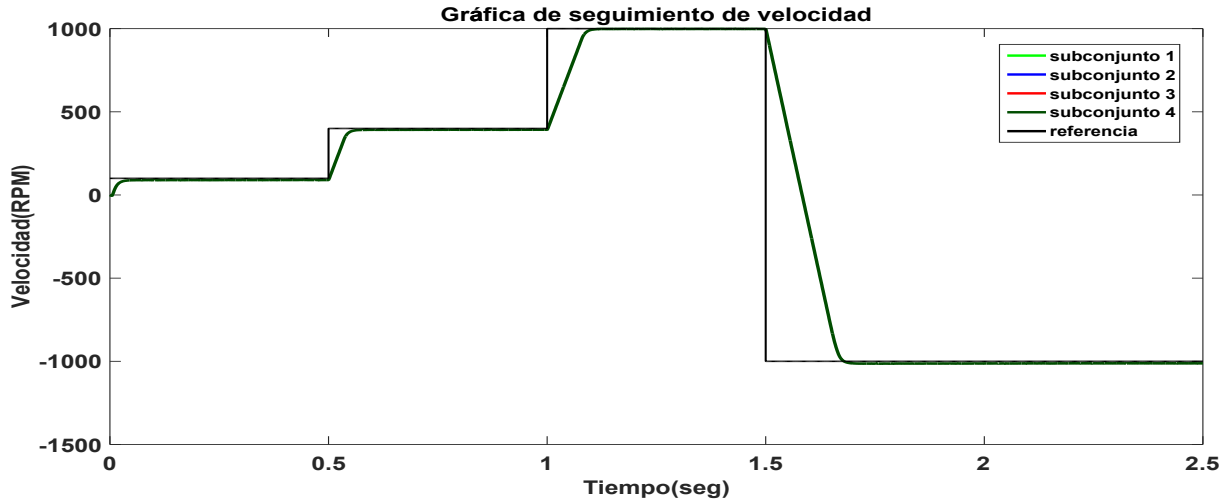


Figura 4.66: Seguimiento de velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 5.

En la figura 4.67 se muestra el comportamiento del par realizando un seguimiento de velocidad con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se muestra que al demandar cambios de escalón en la referencia de velocidad la magnitud del par aumenta, también se aprecia que al demandar una velocidad negativa el control demanda un par negativo por un intervalo de tiempo hasta que la velocidad llega a su referencia. En los recuadros señalados en la figura 4.67 también se muestra que a bajas velocidades es donde hay más distorsión en el par, esto se presentó los intervalos de $t = 0 - 0.5s$ y $t = 1.5 - 1.7s$ en ambos casos la velocidad se encontraba por debajo de los 400 RPM.

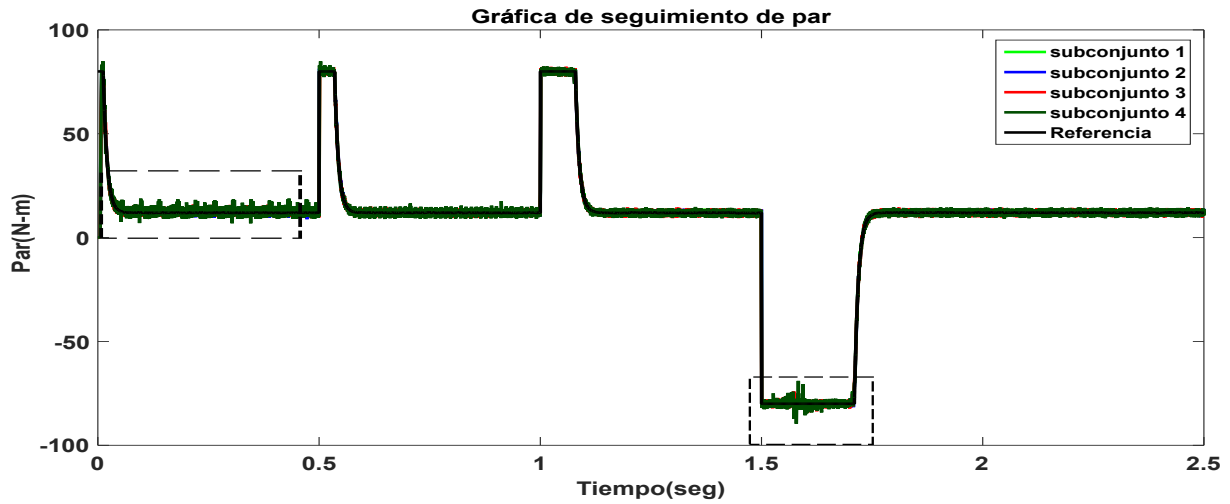


Figura 4.67: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 5.

En la figura 4.68 se muestra el comportamiento del par con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Se muestra que el transitorio del par no tiene mayor cambio respecto a la simulación anterior empleando un $T_s = 100\mu s$. En los recuadros señalados en la figura 4.68 se muestra que el sistema presentó en los mismos intervalos de tiempo un aumento en el error de par, sin embargo, un cambio que se puede apreciar es que al disminuir el tiempo de muestreo el error del par disminuye.

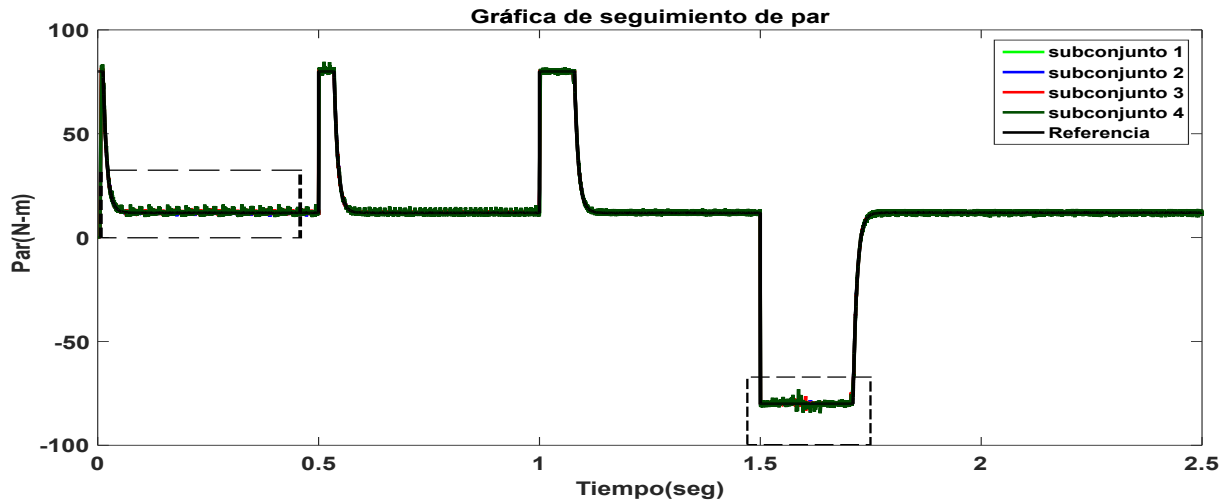


Figura 4.68: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 5.

En la tabla 4.26 se resumen los errores RMS del par, los resultados se presentan en tres intervalos de tiempo junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

Como se muestra en la tabla 4.26 al tomar los subconjuntos con menos vectores el sistema presentó mayor error en bajas velocidades en el intervalo de tiempo de $t = 0.1 - 0.5s$, posteriormente al ir aumentando la velocidad los errores disminuyen.

Resultados								
Subconjunto de vectores	Error RMS del par con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del Par con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de cálculo
	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s		
Subconjunto 1	0.8351	0.8304	0.8302	0.4243	0.4128	0.4193	125	base
Subconjunto 2	0.9356	0.8241	0.8266	0.4808	0.4135	0.4168	44	64.8%
Subconjunto 3	1.3173	0.9811	0.9637	0.6661	0.4984	0.4851	32	74.4%
Subconjunto 4	1.6104	1.1945	1.0235	0.8080	0.6008	0.5174	24	80.8%

Tabla 4.26: Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 5.

Flujo en el estator ψ_s

En la figura 4.69 se muestra el comportamiento del flujo realizando un seguimiento de velocidad con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. En la figura 4.69 se observa que al integrar un factor de peso en la función de costo para dar más prioridad al flujo evita que se presenten o reduzcan los transitorios a bajas velocidades. Sin embargo, en los recuadros de la figura 4.69 se logra apreciar que las distorsiones en el flujo se presentan en los intervalos donde la velocidad se encuentra por debajo de los 400 RPM. Las distorsiones se presentaron para el sistema que evalúa los subconjuntos 3 y 4.

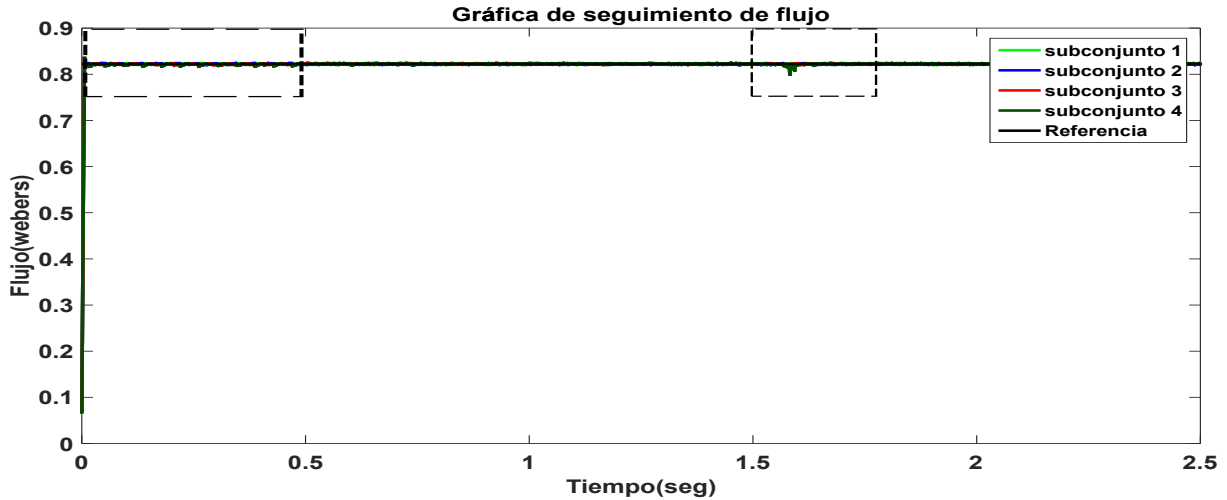


Figura 4.69: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 5.

En la figura 4.70 se muestra el comportamiento del flujo realizando un seguimiento de velocidad con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En los recuadros de la figura 4.70 se logra apreciar que al disminuir el tiempo de muestreo aumenta el error en el seguimiento del flujo.

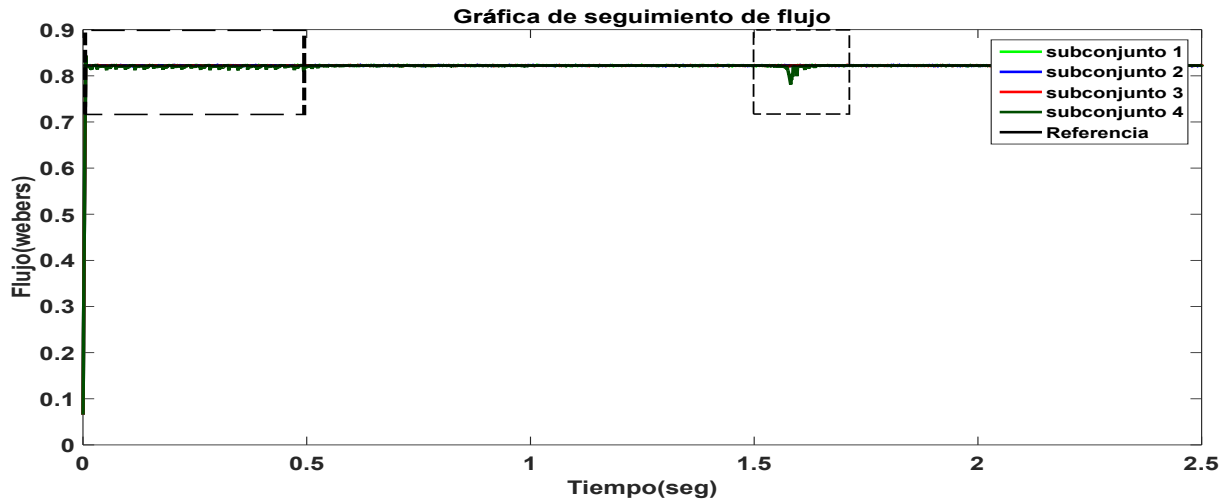


Figura 4.70: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 5.

En la tabla 4.27 se muestran los errores RMS del flujo, los resultados se presentan en tres intervalos de tiempo junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

Como se muestra en la tabla 4.27 al tomar los subconjuntos con menos vectores el sistema presentó mayor error en bajas velocidades en el intervalo de tiempo de $t = 0.1 - 0.5s$, posteriormente al ir aumentando la velocidad los errores disminuyen. El subconjunto 3 y 4 presentaron menor error en el flujo en los intervalos $t = 0.6 - 1s$ y $t = 2 - 2.5s$ ya que en ambos subconjuntos se integró un factor de peso en la función de costo para dar mayor prioridad al flujo.

Resultados								
Subconjunto de vectores	Error RMS del flujo con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del flujo con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de cálculo
	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s		
Subconjunto 1	0.0018	0.0018	0.0018	0.0008	0.0008	0.0008	125	base
Subconjunto 2	0.0020	0.0018	0.0018	0.0009	0.0008	0.0008	44	64.8%
Subconjunto 3	0.0019	0.0015	0.0015	0.0009	0.0007	0.0007	32	74.4%
Subconjunto 4	0.0022	0.0014	0.0014	0.0009	0.0007	0.0007	24	80.8%

Tabla 4.27: Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 5.

Tensiones en el estator V_s

A continuación, en la figura 4.71 y 4.72 se muestra las tensiones de salida del inversor evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente. En ambas figuras se observa que al disminuir la velocidad del rotor el inversor entrega niveles de tensión bajos y conforme aumentar la velocidad angular el inversor entrega mayores niveles de tensión.

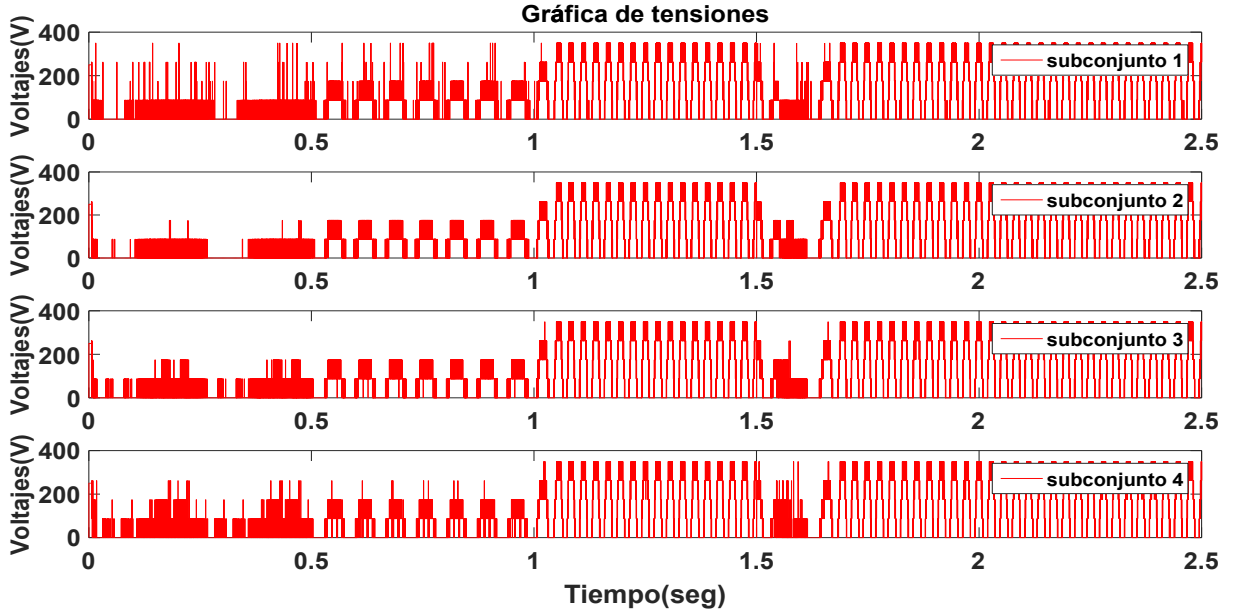


Figura 4.71: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 5.

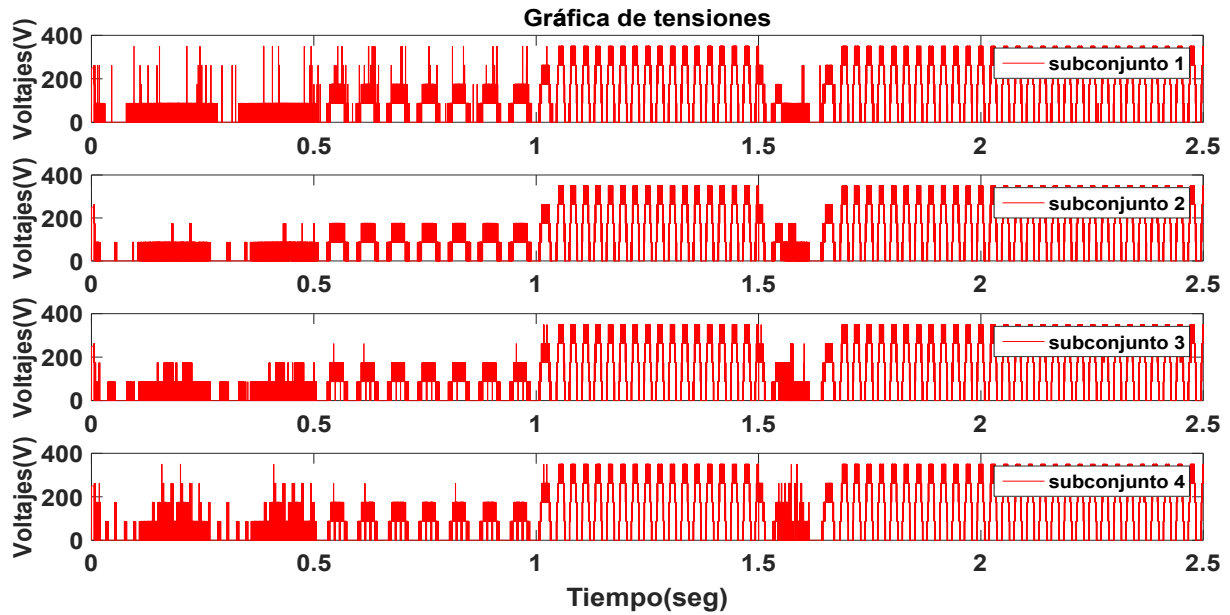


Figura 4.72: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 5.

En la tabla 4.28 se muestra el total de vectores a evaluar y su reducción en %; los resultados se comparan con el subconjunto 1. Los resultados muestran que al evaluar dos subconjuntos de vectores aumenta el número de operaciones, la reducción máxima que se tuvo fué de un 80.8% para el subconjunto 4.

Resultados			
Subconjunto	Número de vectores a evaluar	Reducción en operaciones	Reducción
Subconjunto 1	125	Base	Base
Subconjunto 2	44	81	64.8 %
Subconjunto 3	32	93	74.4 %
Subconjunto 4	24	101	80.8 %

Tabla 4.28: Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 5.

En la tabla 4.29 se muestra el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión para cada subconjunto. Los resultados muestran un aumento en el número de saltos de nivel al dar mayor prioridad al flujo y reducir el número de vectores a evaluar, esto se

presentó en el sistema que evaluaba los subconjuntos 3 y 4.

Subconjunto	Resultados											
	Tiempo de muestreo de $=T_s = 100\mu s$						Tiempo de muestreo de $=T_s = 50\mu s$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c
subconjunto 1	10935	10578	10722	438	415	416	21687	21158	21397	585	603	618
subconjunto 2	10641	10341	10513	285	249	230	21114	20600	20955	515	456	467
subconjunto 3	10091	9811	9965	401	332	368	20195	19767	19948	814	758	818
subconjunto 4	9919	9763	9883	805	730	881	18238	17841	18008	1364	1161	1454

Tabla 4.29: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 5.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 4.73-4.76, se muestran las corrientes de fase, para el seguimiento de velocidad, con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase a se muestran en color rojo, para la fase b en color azul y para la fase c en color verde.

Primeramente, se muestra que al cambiar el signo de giro en $t = 1.6s$ las fases en el estator cambian su secuencia colocando primero la fase c después la fase b y al último la fase a . Se observa que al integrar un factor de peso para dar más prioridad al flujo del estator disminuye el transitorio y la distorsión en las corrientes. En el recuadro de la figura 4.76 muestra que el sistema que evalúa el subconjunto 4 presentó mayor distorsión en el intervalo de $t = 0 - 0.5s$, en este intervalo la velocidad se encontraba en 100 RPM.

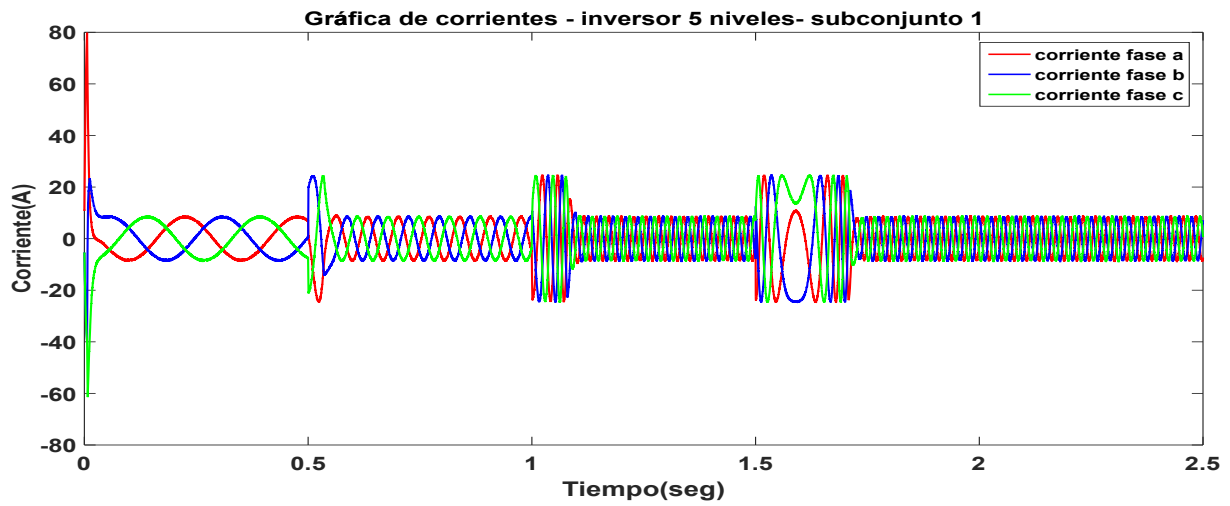


Figura 4.73: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 5.

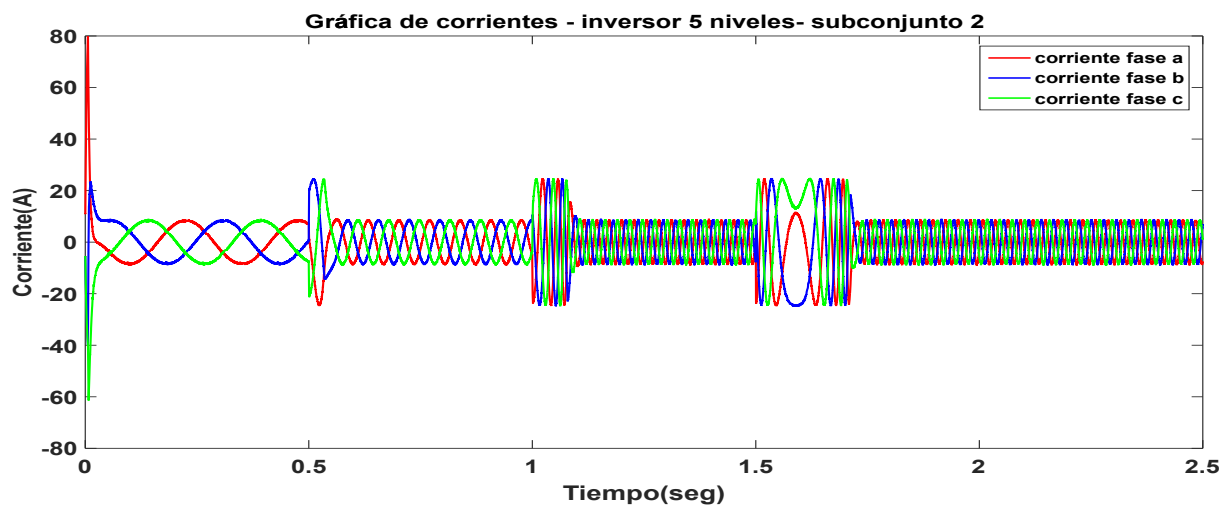


Figura 4.74: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 5.

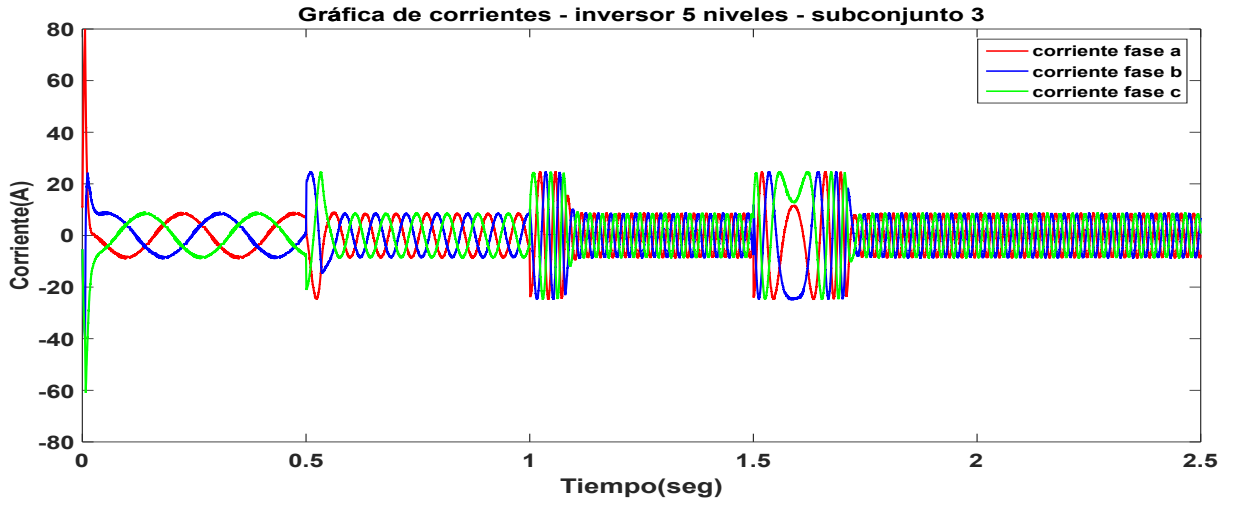


Figura 4.75: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 5.

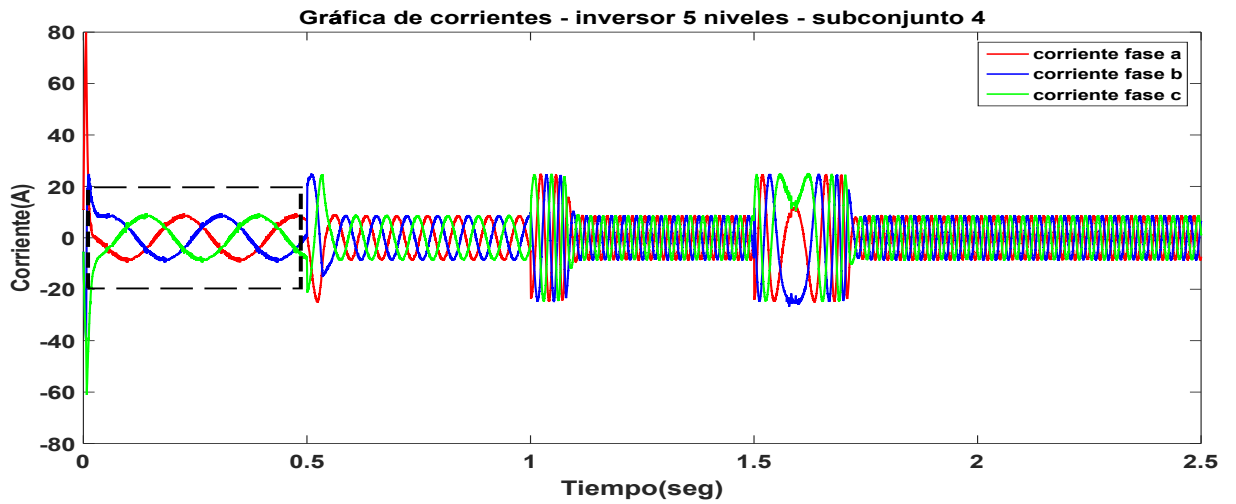


Figura 4.76: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 5.

En las figuras 4.77-4.80, se muestran las corrientes de fase, en el seguimiento de velocidad, con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

Se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo, el sistema con un $T_s = 50\mu s$ pre-

senta una menor distorsión en las corrientes después del transitorio. En el recuadro de la figura 4.80 muestra que el sistema que evalúa el subconjunto 4 presentó mayor distorsión en el intervalo de $t = 0 - 0.5s$.

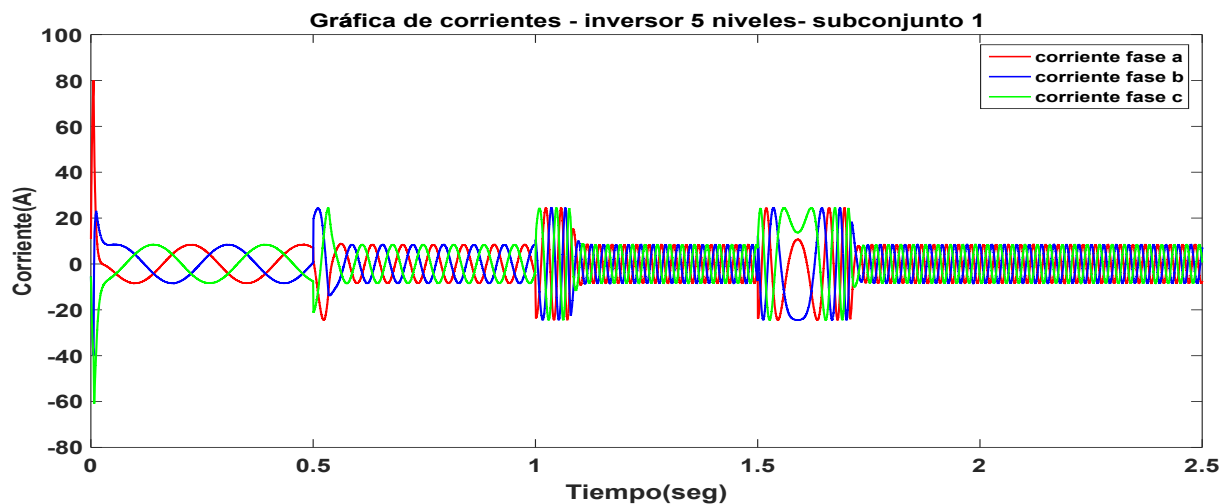


Figura 4.77: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 5.

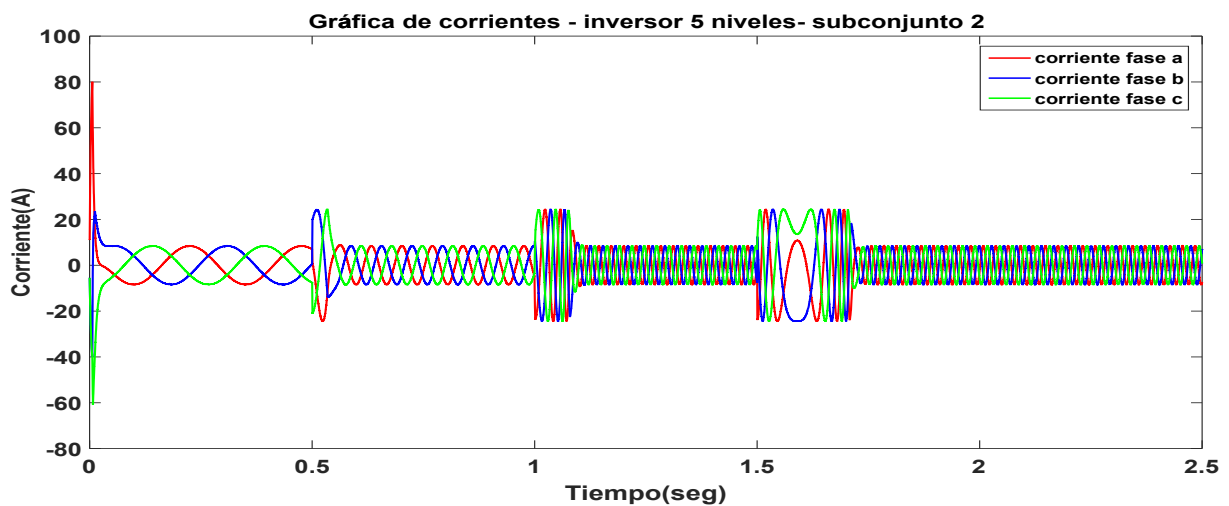


Figura 4.78: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 5.

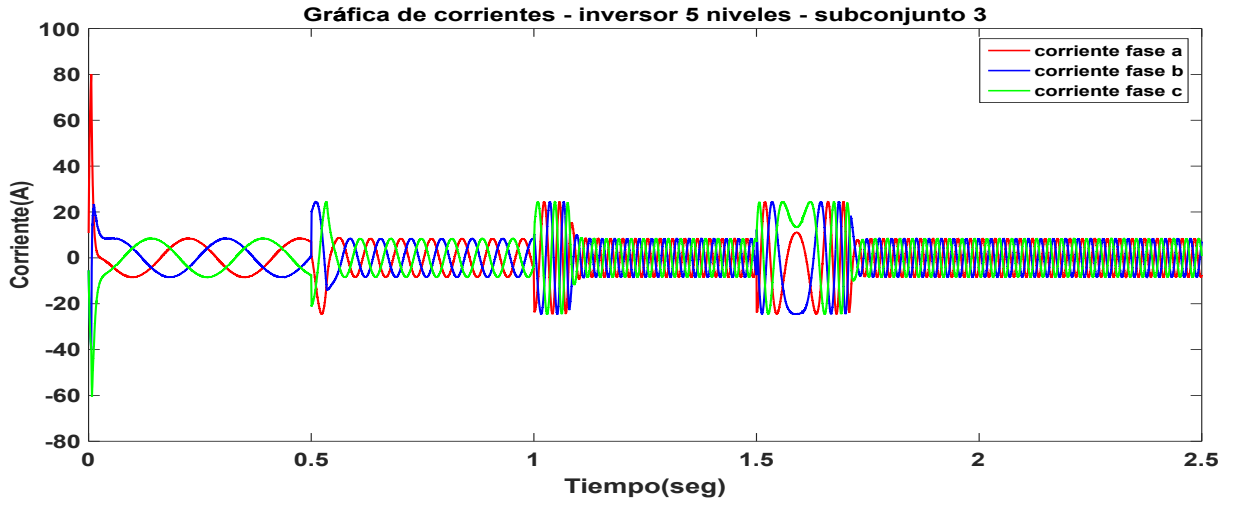


Figura 4.79: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 5.

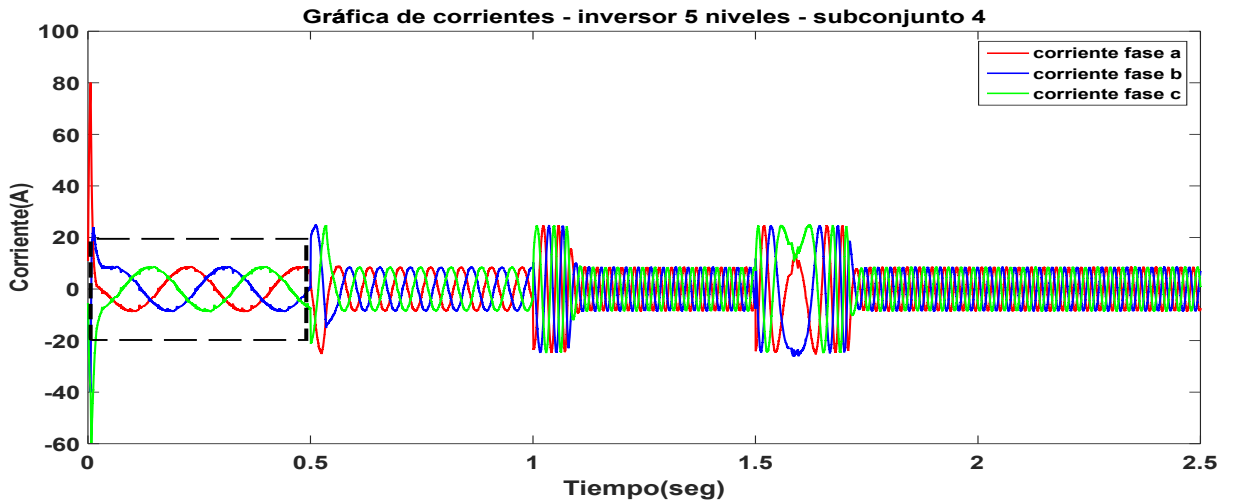


Figura 4.80: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 5.

En la tabla 4.30 se muestran los valores de la distorsión armónica con su frecuencia fundamental y el valor del rizo máximo en las corrientes del estator para tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran que en el intervalo de $t = 0.1 - 0.5s$ el sistema que evaluó el subconjunto 4 fue el que presentó mayor distorsión y mayores niveles de rizo en las corrientes con respecto a los demás subconjuntos. También se puede observar que para los intervalos $t = 0.6 - 1s$

y $t = 2 - 2.5s$ los valores de distorsión y rizo en las corrientes eran similares para cualquier subconjunto que se evalúa.

Resultados												
Subconjunto	Tiempo de muestreo = 100μs						Tiempo de muestreo = 50μs					
	t=0.05-0.5s		t=0.6-0.1s		t=2-2.5s		t=0.1-0.5s		t=0.6-0.1s		t=2-2.5s	
	Ff = 4 Hz		Ff = 15 Hz		Ff = 35 Hz		Ff = 4 Hz		Ff = 15 Hz		Ff = 35 Hz	
	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo
subconjunto 1	4.5	1.03 A	6.33	1.17 A	5.85	1.31 A	2.4	0.51 A	4.9	0.61 A	4.15	0.64 A
subconjunto 2	4.81	1.24 A	6.14	1.20 A	5.9	1.25 A	2.53	0.67 A	4.99	0.60 A	4.25	0.67 A
subconjunto 3	5.38	1.36 A	6.25	1.24 A	5.91	1.13 A	2.80	0.68 A	4.88	0.63 A	4.17	0.56 A
subconjunto 4	6.36	2.36 A	6.39	1.34 A	5.92	1.11 A	3.60	1.05 A	5.15	1.02 A	4.07	0.57 A

Tabla 4.30: Distorsión armónica y rizo máximo en las corrientes del estator - Prueba 5.

4.3.6. Prueba 6.- Tren de Velocidad con factor de peso en el salto de nivel

En esta prueba, las estrategias de control FCS-MPC serán evaluadas con un lazo de control de velocidad de tipo PI, donde la velocidad de referencia será cambiada de forma escalonada. En la figura 3.33 se muestra el diagrama de control para esta prueba. Primero se lleva el motor a un flujo nominal de 0.8 webers en un intervalo de tiempo de $t = 0 - 0.005s$. Posteriormente se demandará una secuencia de velocidad de 100 - 400 - 1000 - -1000 RPM, con un intervalo de 0 - 0.5 - 1 - 1.5 s entre cada cambio de magnitud, manteniendo una referencia de flujo de 0.8 webers, el tiempo de simulación será de 2.5 segundos. Al igual que en las pruebas anteriores se evaluarán dos subconjuntos de vectores al mismo tiempo tomando en cuenta la ec. (4.6) esto es necesario para lograr el cambio de giro y también se integrará un factor de peso λ_1 para dar prioridad al flujo del estator. Las pruebas se realizaron con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. La constante proporcional e integral del controlador de velocidad son $K_p = 5$ y $K_i = 1$; la sintonización fué realizada heurísticamente. Además, el sistema posee un par de carga de $T_L = 11.9N - m$.

En esta prueba se integrará otro factor de peso λ_2 a la función de costo como se muestra en la ecuación 4.7, el objetivo es disminuir los saltos en más de un nivel de tensión. Los valores del factor de peso se determinaron siguiendo los pasos que se presentan en [12]. En la tabla 4.31 se muestran los valores del factor de peso λ para los diferentes subconjuntos. Las pruebas se realizaron con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

$$J_i = \left| T_e^* - T_e^{k+1} \right| + \lambda_1 \left(\left| \overrightarrow{\psi_s^{*k}} - \overrightarrow{\psi_s^{k+1}} \right| \right) + \lambda_2 \left(\left| S_a - S_a^{k+1} \right| + \left| S_b - S_b^{k+1} \right| + \left| S_c - S_c^{k+1} \right| \right) \quad (4.7)$$

Subconjunto de vectores	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Valor del factor de peso 1	Valor del factor de peso 2
subconjunto 1	0°	360°	na	na	na	0.001
subconjunto 2	30°	150°	210°	330°	na	0.001
subconjunto 3	60°	120°	240°	300°	2	0.001
subconjunto 4	70°	110°	250°	290°	2.5	0.001

Tabla 4.31: Definición de valores en los ángulos de cada subconjunto- Prueba 6.

Par T_e -Velocidad ω_r

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a la prueba VI aplicando el método de reducción de cálculos. El sistema tomando el subconjunto 1 se muestra con una traza de color verde claro, el subconjunto 2 se muestra de color azul, el subconjunto 3 se muestra de color rojo, el subconjunto 4 se muestra en verde fuerte siguiendo la referencia mostrada en color negro.

En la figura 4.81 se muestra el seguimiento de velocidad, integrando dos factores de peso en la función de costo con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se observa un correcto seguimiento entre la referencia de velocidad ω_r^* y la velocidad medida ω_r .

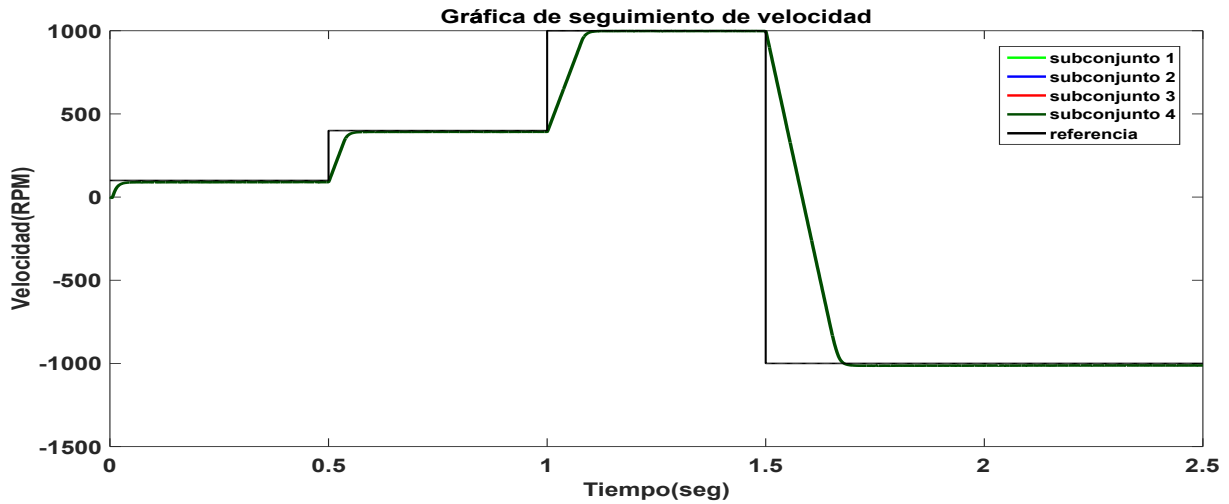


Figura 4.81: Seguimiento de velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 6.

En la figura 4.82 se muestra el comportamiento del par realizando un seguimiento de velocidad, integrando dos factores de peso en la función de costo con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Se muestra que al demandar cambios de escalón en la referencia de velocidad la magnitud del par aumenta, también se aprecia que al demandar una velocidad negativa el control demanda un par negativo por un intervalo de tiempo hasta que la velocidad llega a su referencia. En los recuadros señalados en la figura 4.82 muestra donde hay mayor error en el par, este problema se presentó los intervalos de $t = 0 - 0.5s$ y $t = 1.5 - 1.7s$ en ambos casos la velocidad se

encontraba por debajo de los 400 RPM. También se observa que integrando otro factor de peso a la función de costo para disminuir los saltos de nivel aumenta el error en el par.

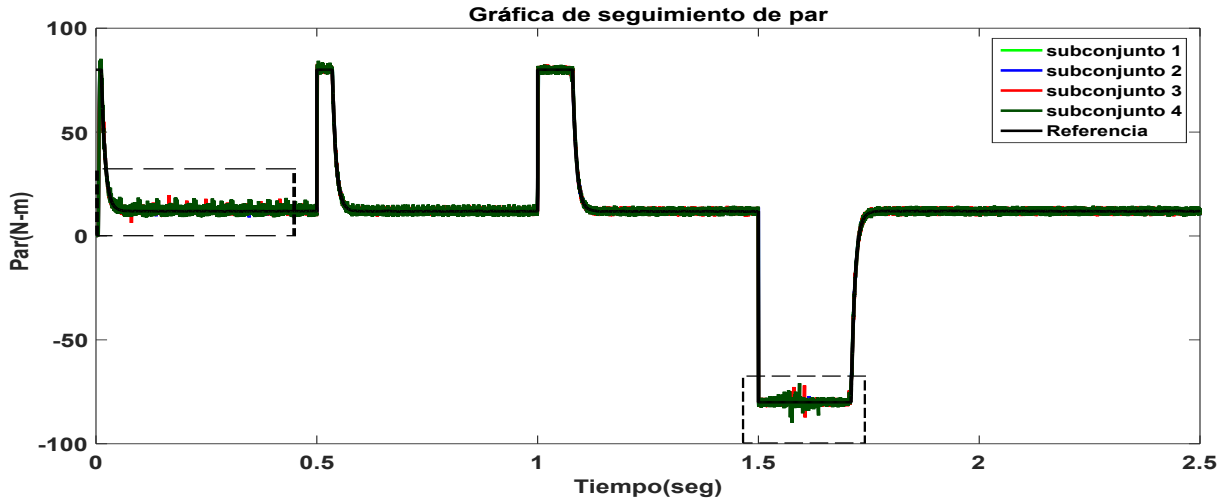


Figura 4.82: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 6.

En la figura 4.83 se muestra el comportamiento del par realizando un seguimiento de velocidad, integrando dos factores de peso en la función de costo con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En los recuadros señalados en la figura 4.83 se muestra que el sistema presentó en los mismos intervalos de tiempo un aumento en el error de par, sin embargo, un cambio que se puede apreciar es que al disminuir el tiempo de muestreo el error entre la referencia del par disminuye.

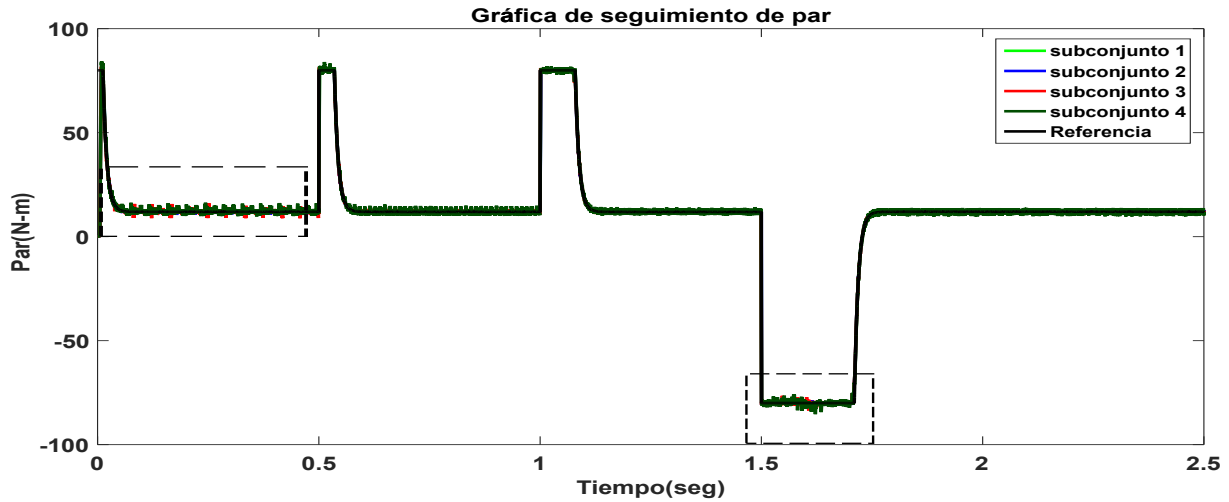


Figura 4.83: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 6.

En la tabla 4.32 se muestran los errores RMS del par, los resultados se presentan en tres intervalos de tiempo junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

Como se muestra en la tabla 4.32 al tomar los subconjuntos con menos vectores a evaluar el sistema presenta mayor error en el intervalo de tiempo de $t = 0.1 - 0.5s$, en este intervalo la velocidad se encontraba en 100 RPM, a velocidades mayores los errores disminuían. Los resultados también muestran que al integrar un nuevo factor de costo para disminuir los saltos de nivel aumenta el error del par en comparación con la prueba V.

Resultados								
Subconjunto de vectores	Error RMS del par con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del Par con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de calculo
	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s		
Subconjunto 1	0.8379	0.8412	0.8419	0.4290	0.4222	0.4223	125	base
Subconjunto 2	0.9588	0.8393	0.8339	0.4857	0.4318	0.4278	44	64.8%
Subconjunto 3	1.3076	1.0251	0.9933	0.6631	0.5250	0.5106	32	74.4%
Subconjunto 4	1.5891	1.2015	1.0420	0.7818	0.6190	0.5226	24	80.8%

Tabla 4.32: Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 6.

Flujo en el estator ψ_s

En la figura 4.84 se muestra el comportamiento del flujo realizando un seguimiento de velocidad, integrando dos factores de peso en la función de costo con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. En la figura 4.84 se observa que al integrar un factor de peso en la función de costo para dar más prioridad al flujo evita que se presenten o se reduzcan los transitorios a bajas velocidades. Sin embargo, al integrar otro factor de peso para disminuir los saltos de nivel el error del flujo aumenta. En los recuadros de la figura 4.84 se logra apreciar que el mayor error en el flujo se presentó en los intervalos de $t = 0.1 - 0.5s$ y $t = 1.5 - 1.7s$, en ambos casos la velocidad se encuentra por debajo de los 400 RPM. Los mayores errores se presentaron para el sistema que evaluaba los subconjuntos 3 y 4.

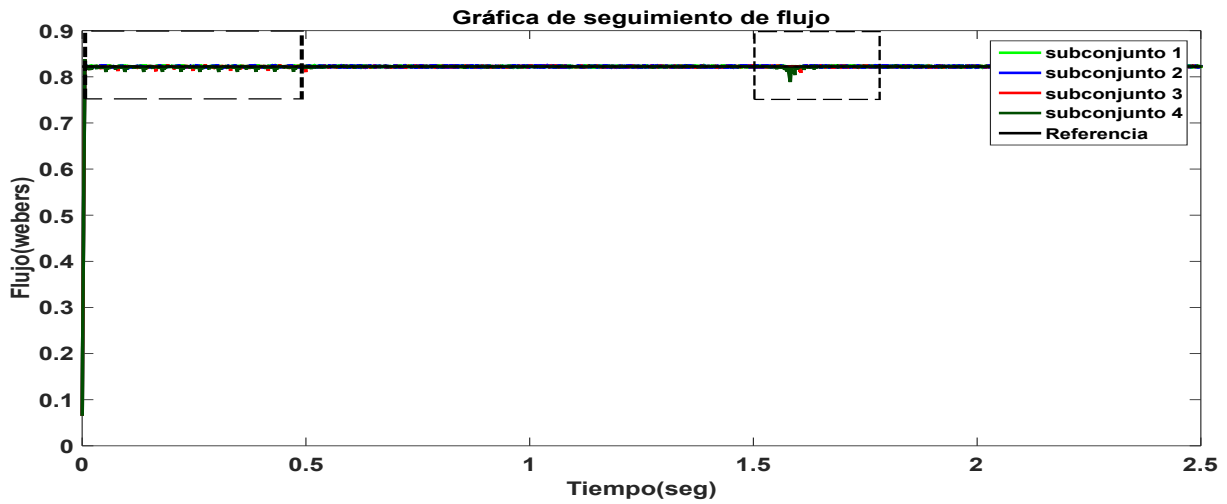


Figura 4.84: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 6.

En la figura 4.85 se muestra el comportamiento del flujo realizando un seguimiento de velocidad, integrando dos factores de peso en la función de costo con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En los recuadros señalados en la figura 4.85 se muestra que el sistema presentó en los mismos intervalos de tiempo un aumento en el error de flujo, sin embargo, un cambio que se puede apreciar es que al disminuir el tiempo de muestreo el error del flujo aumenta.

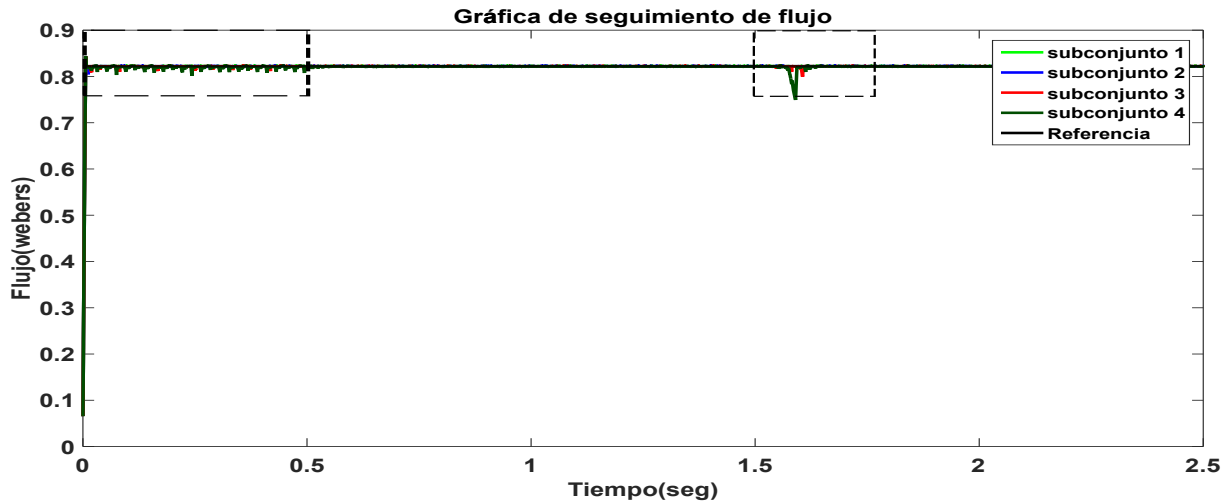


Figura 4.85: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 6.

En la tabla 4.33 se muestran los errores RMS del flujo, los resultados se presentan en tres intervalos de tiempo junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

Como se muestra en la tabla 4.33 al tomar los subconjuntos con menos vectores a evaluar el sistema presentó mayor error en el intervalo de tiempo de $t = 0.1 - 0.5s$ en este intervalo la velocidad se encontraba en 100 RPM, posteriormente en los siguientes intervalos los errores disminuyen. También los resultados muestran que al integrar un factor de peso para disminuir el número de saltos de nivel aumenta el error en el flujo en comparación con prueba V.

Resultados								
Subconjunto de vectores	Error RMS del flujo con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del flujo con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de calculo
	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s		
Subconjunto 1	0.0018	0.0018	0.0018	0.0008	0.0008	0.0008	125	base
Subconjunto 2	0.0020	0.0018	0.0018	0.0010	0.0008	0.0008	44	64.8%
Subconjunto 3	0.0021	0.0015	0.0015	0.0016	0.0009	0.0008	32	74.4%
Subconjunto 4	0.0028	0.0014	0.0014	0.0031	0.0007	0.0007	24	80.8%

Tabla 4.33: Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 6.

Tensiones en el estator V_s

A continuación, en las figuras 4.86 y 4.87 se muestran las tensiones de salida del inversor evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente.

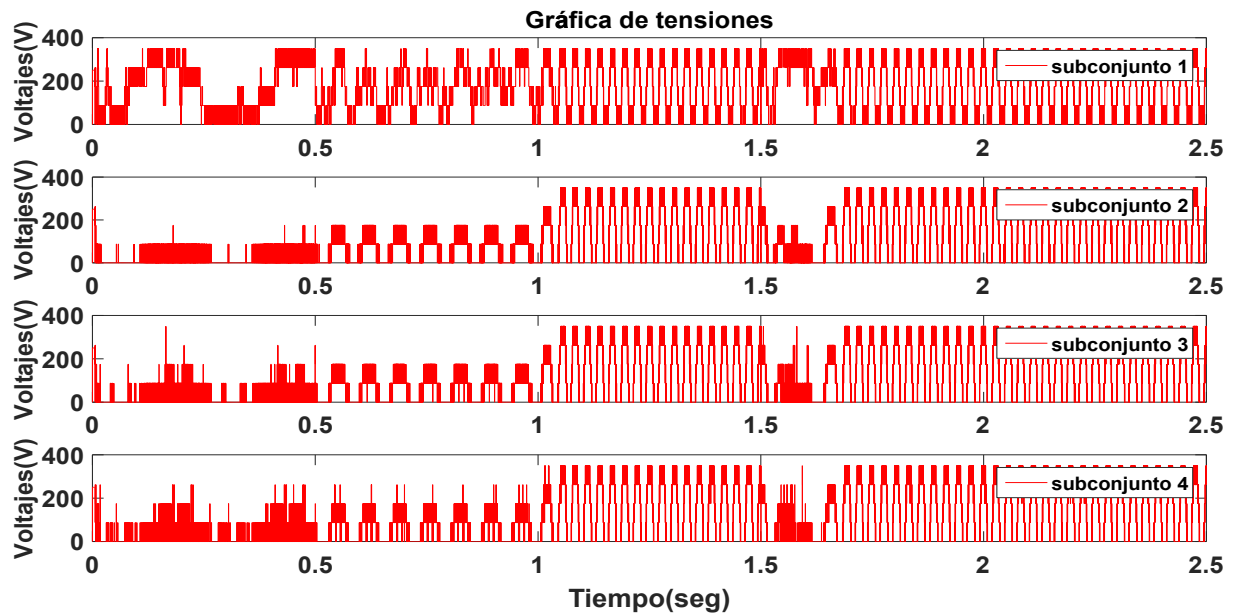


Figura 4.86: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 6.

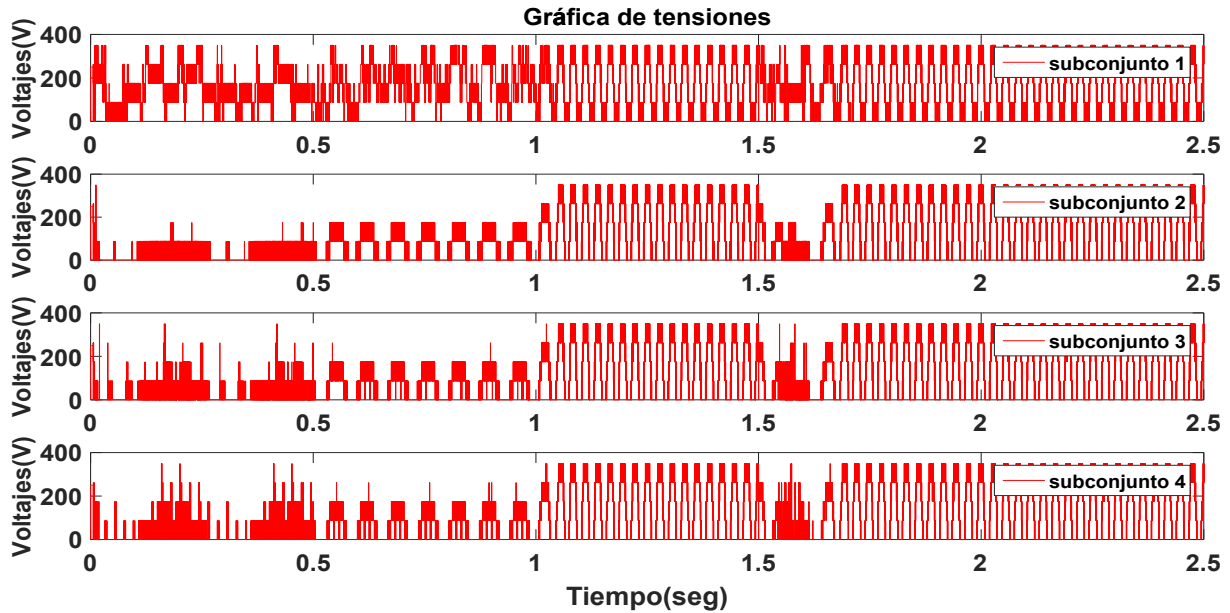


Figura 4.87: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 6.

En la tabla 4.34 se muestra el total de vectores a evaluar y su reducción en %; los resultados se comparan con el subconjunto 1. los resultados muestran que al evaluar dos subconjuntos de vectores aumenta el número de operaciones, la reducción máxima que se tuvo fue de un 80.8% para el subconjunto 4.

Resultados			
Subconjunto	Número de vectores a evaluar	Reducción en operaciones	Reducción
Subconjunto 1	125	Base	Base
Subconjunto 2	44	81	64.8 %
Subconjunto 3	32	93	74.4 %
Subconjunto 4	24	101	80.8 %

Tabla 4.34: Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 6.

En la tabla 4.35 se muestra el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión para cada subconjunto. Los resultados muestran que, al integrar un factor de peso en la función de costo para disminuir el número de saltos, si los disminuye, sin embargo,

todavía los subconjuntos que presentaron mayor número de saltos fueron el subconjunto 3 y 4. Los resultados muestran que el sistema que evaluó el subconjunto 1 fue el que más reducción en número de saltos obtuvo respecto a la prueba V.

Subconjunto	Resultados											
	Tiempo de muestreo de $=T_s = 100\mu s$						Tiempo de muestreo de $=T_s = 50\mu s$					
	Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
subconjunto 1	8308	8149	8148	13	10	8	16381	16016	16189	16	19	14
subconjunto 2	10293	10065	10235	206	198	163	20277	19608	20018	366	296	316
subconjunto 3	9692	9506	9662	359	339	348	18721	18326	18651	685	565	660
subconjunto 4	9719	9600	9686	775	724	861	17814	17532	17761	1342	1100	1409

Tabla 4.35: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 6.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 4.88-4.91, se muestran las corrientes de fase, para el seguimiento de velocidad, integrando dos factores de peso en la función de costo con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

Primeramente, se muestra que al cambiar el sentido de giro en $t = 1.6s$ las fases en el estator cambian de secuencia colocando primero la fase *c* después la fase *b* y al último la fase *a*. Se puede observar que al integrar un segundo factor de peso para disminuir los saltos de nivel incrementa la distorsión en las corrientes. En los recuadros señalados en la figura 4.90 y 4.91 se puede observar que la mayor distorsión en las corrientes se presentó en el intervalo de $t = 0.1 - 0.5s$, este problema se presentó en el sistema que evalúa los subconjuntos 3 y 4.

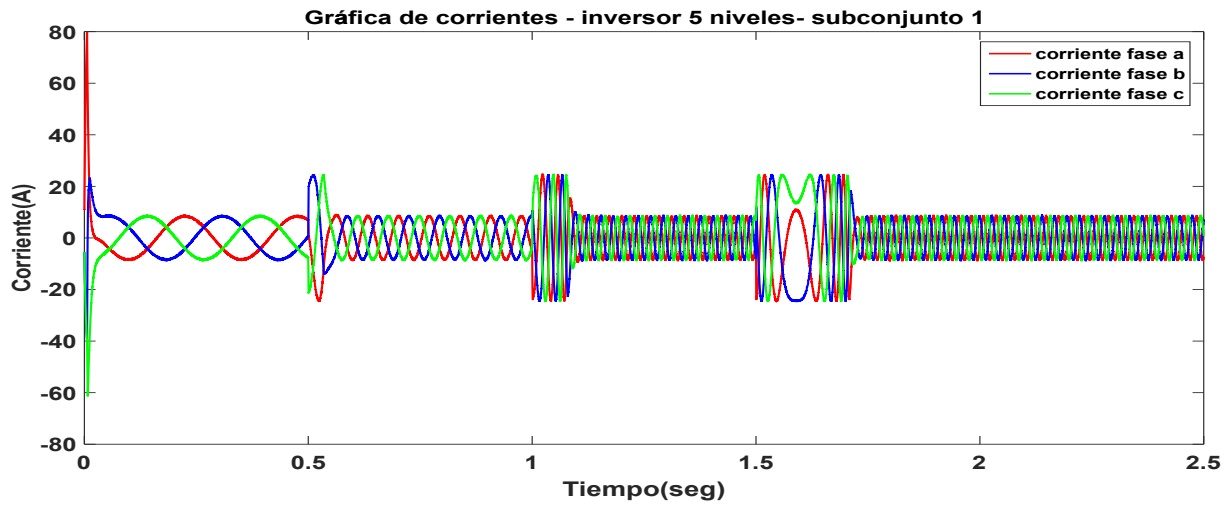


Figura 4.88: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 6.

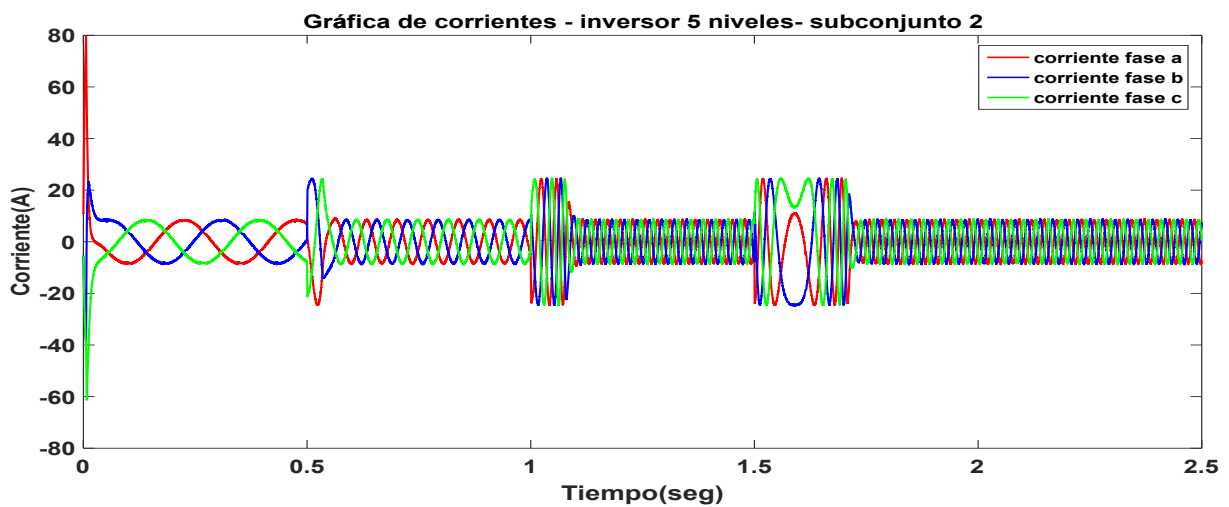


Figura 4.89: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 6.

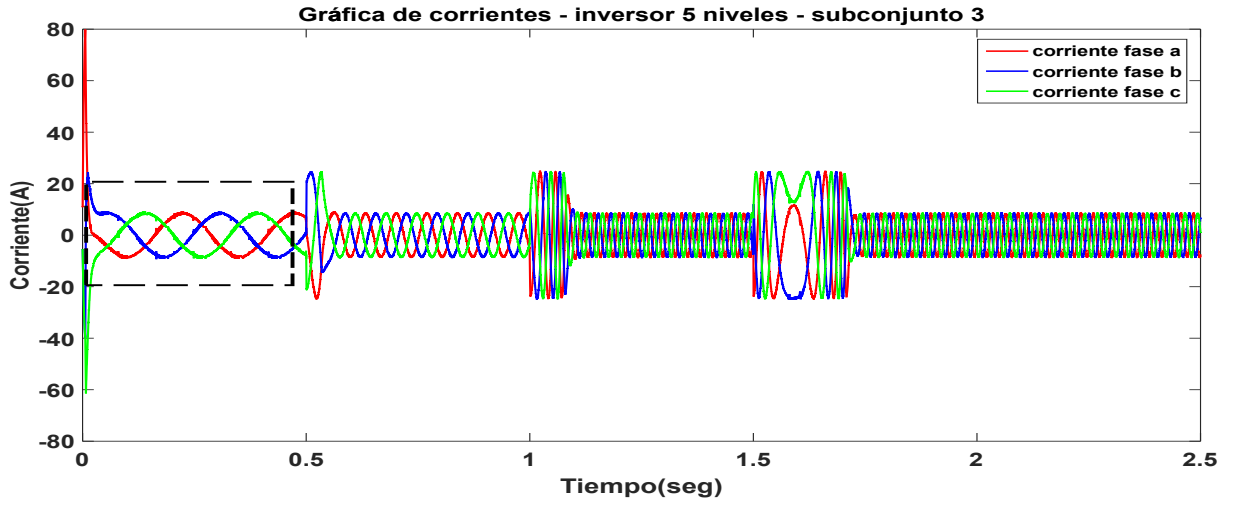


Figura 4.90: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 6.

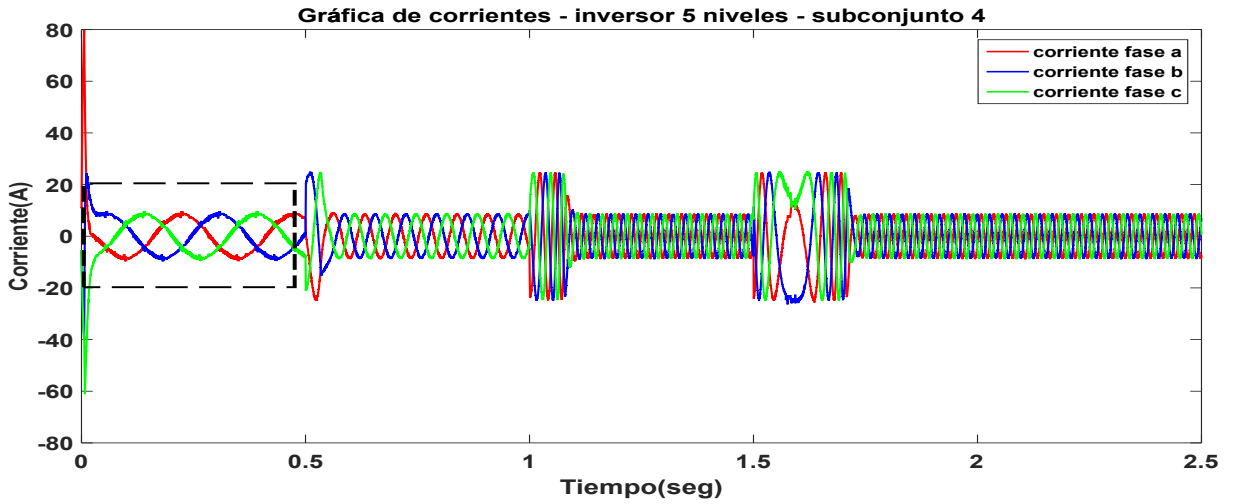


Figura 4.91: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 6.

En las figuras 4.92-4.95, se muestran las corrientes de fase, en el seguimiento de velocidad, integrando un factor de peso en la función de costo con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

Se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo, el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta una mayor distorsión en las corrientes después del transitorio. En el recuadro señalado en las figuras 4.94 y 4.95 muestra que la mayor distorsión se presentó en el intervalo de $t = 0.1 - 0.5s$ para el sistema que evalúa el subconjunto 3 y 4.

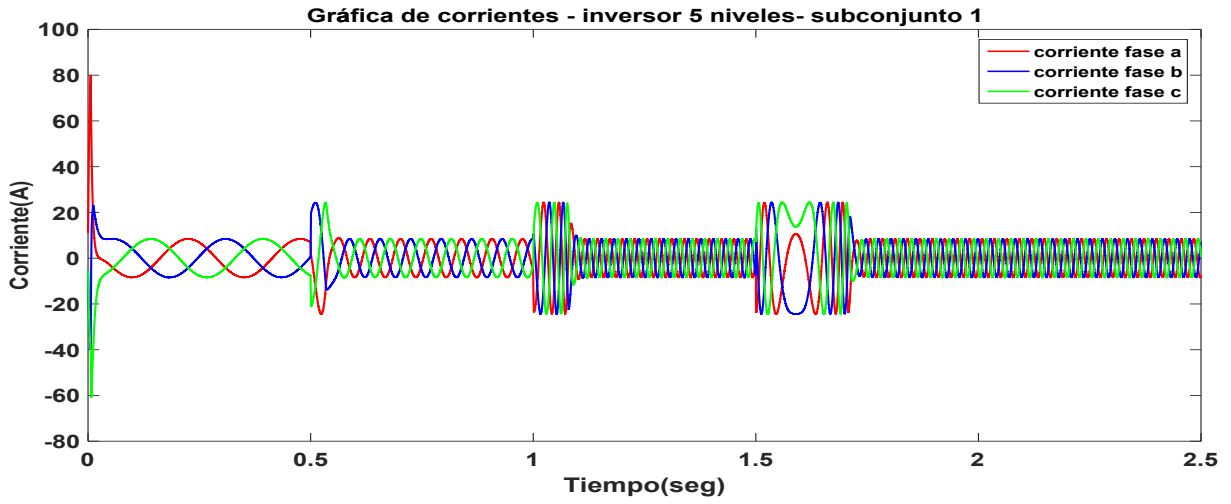


Figura 4.92: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 6.

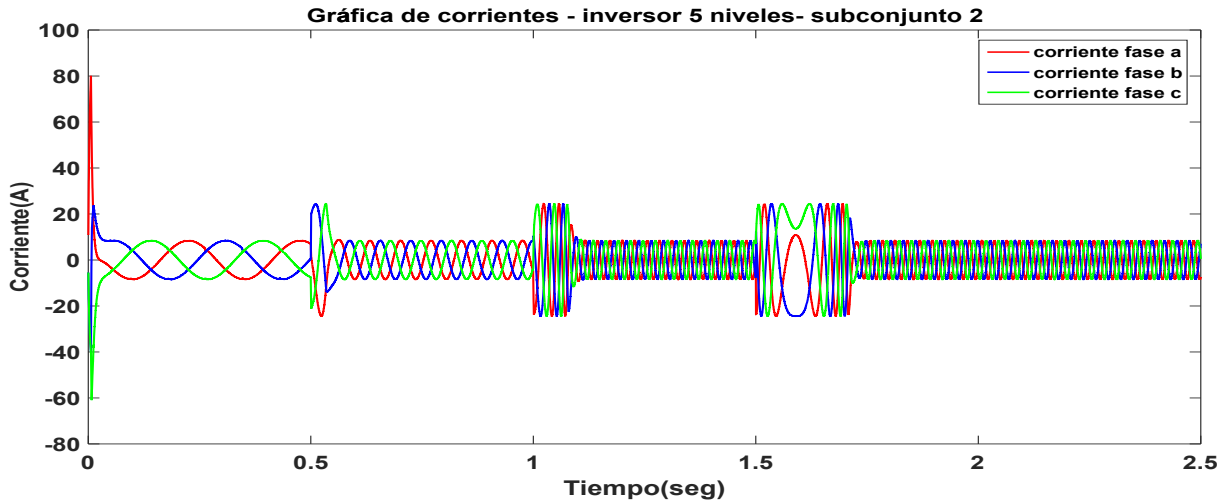


Figura 4.93: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 6.

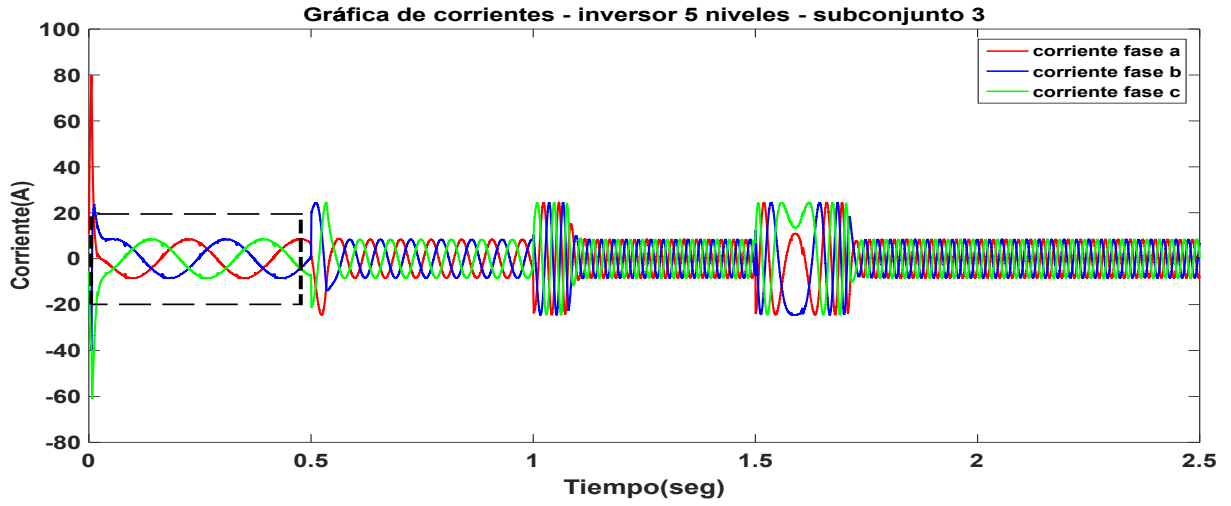


Figura 4.94: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 6.

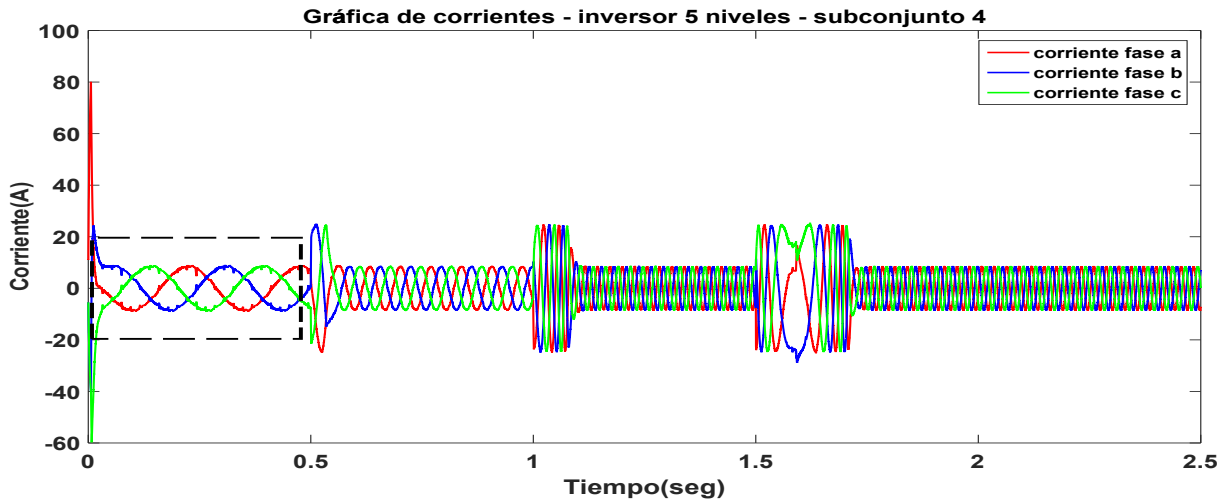


Figura 4.95: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 6.

En la tabla 4.36 se muestran los valores de la distorsión armónica con su frecuencia fundamental y el valor del rizo máximo en las corrientes del estator para tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran que en el intervalo de $t = 0.1 - 0.5s$ el sistema que evaluó el subconjunto 3 y 4 fueron los que presentaron mayor distorsión y mayores niveles de rizo en las corrientes con respecto a los demás subconjuntos. También se puede observar que al inte-

grar un segundo factor de peso para dar prioridad en el salto de nivel genera un incremento en la distorsión de la corriente para el intervalo de $t = 0.1 - 0.5s$ en comparación con la prueba V. Posteriormente los resultados muestran que en los siguientes intervalos los valores de la distorsión y el rizo se mantienen en magnitudes similares para cualquier subconjunto.

Subconjunto	Resultados											
	Tiempo de muestreo = $100\mu s$						Tiempo de muestreo = $50\mu s$					
	t=0.05-0.5s		t=0.6-0.1s		t=2-2.5s		t=0.1-0.5s		t=0.6-0.1s		t=2-2.5s	
	Ff = 4 Hz		Ff = 15 Hz		Ff = 35 Hz		Ff = 4 Hz		Ff = 15 Hz		Ff = 35 Hz	
	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo
subconjunto 1	4.59	1.01 A	6.32	1.18 A	5.69	1.24 A	2.43	0.51 A	5.01	0.60 A	4.26	0.65 A
subconjunto 2	4.84	1.13 A	6.27	1.21 A	5.56	1.22 A	2.64	0.63 A	5.04	0.61 A	4.13	0.66 A
subconjunto 3	5.64	2.31 A	6.58	1.15 A	5.83	1.09 A	2.80	1.40 A	5.05	0.63 A	4.20	0.54 A
subconjunto 4	6.8	2.08 A	6.48	1.37 A	5.65	1.13 A	5.51	1.05 A	5.15	0.69 A	4.14	0.57 A

Tabla 4.36: Distorsión armónica y rizo máximo en las corrientes del estator - Prueba 6.

4.3.7. Prueba 7.- Tren de Velocidad con incertidumbre en parámetros del sistema

En esta prueba, las estrategias de control FCS-MPC serán evaluadas con un lazo de control de velocidad de tipo PI, donde la velocidad de referencia será cambiada de forma escalonada. En la figura 3.33 se muestra el diagrama de control para esta prueba. Primero se lleva el motor a un flujo nominal de 0.8 webers en un intervalo de tiempo de $t = 0 - 0.005s$. Posteriormente se demandará una secuencia de velocidad de 100 - 400 - 1000 - -1000 RPM, con un intervalo de 0 - 0.5 - 1 - 1.5 s entre cada cambio de magnitud, manteniendo una referencia de flujo de 0.8 webers, el tiempo de simulación será de 2.5 segundos. Al igual que en las pruebas anteriores se evaluarán dos subconjuntos de vectores al mismo tiempo tomando en cuenta la ec. (4.6) esto es necesario para lograr el cambio de giro y también se integraran dos factores de peso λ_1 y λ_2 para dar prioridad al flujo del estator y disminuir los saltos en más de un nivel de tensión. Las pruebas se realizaron con tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. La constante proporcional e integral son $K_p = 5$ y $K_i = 1$; la sintonización fue realizada heurísticamente. Además, el sistema posee un par de carga de $T_L = 11.9N - m$.

En esta prueba los valores de los parámetros de la máquina de inducción tendrán una incertidumbre de $R_s = +10\%$, $R_r = -10\%$ y $X_{ls} = -5\%$. El objetivo es evaluar la robustez del control FCS-MPC ante ciertas incertidumbres en el sistema.

Par T_e -Velocidad ω_r

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a la prueba VII aplicando el método de reducción de cálculos. El sistema tomando el subconjunto 1 se muestra con una traza de color verde claro, el subconjunto 2 se muestra de color azul, el subconjunto 3 se muestra de color rojo, el subconjunto 4 se muestra en verde fuerte siguiendo la referencia mostrada en color negro.

En la figura 4.96 se muestra el seguimiento de velocidad angular, integrando dos factores de peso en la función de costo e incertidumbres en los parámetros del sistema con un tiempo de

muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Se observa un correcto seguimiento entre la referencia de velocidad ω_r^* y la velocidad medida ω_r .

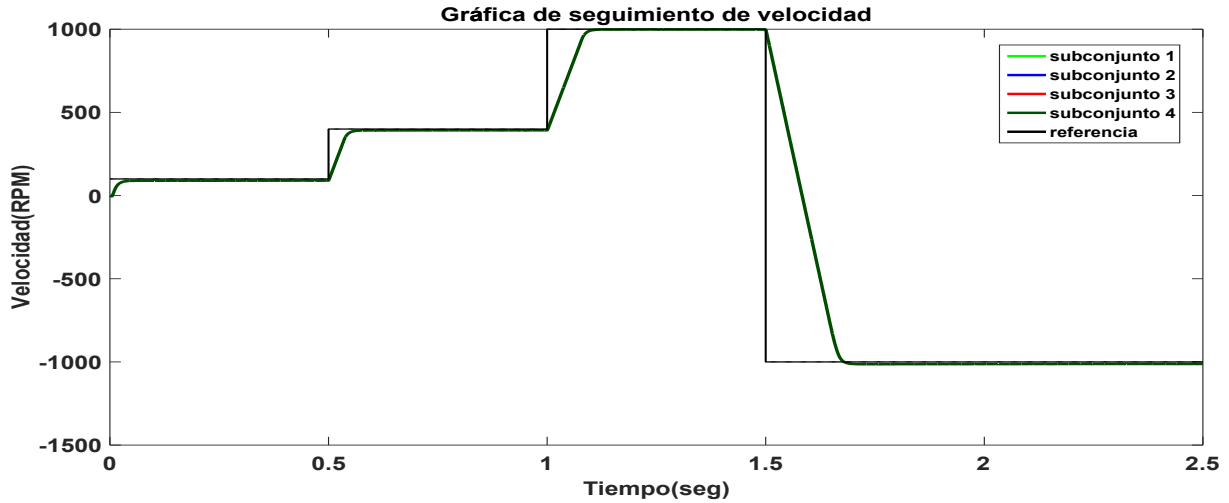


Figura 4.96: Seguimiento de velocidad angular aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$ y $50\mu s$ - Prueba 7.

En la figura 4.97 se muestra el comportamiento del par realizando un seguimiento de velocidad, integrando dos factores de peso en la función de costo e incertidumbres en los parámetros del sistema con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Al igual que en la prueba anterior se muestra que al demandar cambios de escalón en la referencia de velocidad la magnitud del par aumenta, también se aprecia que al demandar una velocidad negativa el control demanda un par negativo por un intervalo de tiempo hasta que la velocidad llega a su referencia. En la figura 4.97 se muestra que a pesar de las incertidumbres en los parámetros del sistema el control realiza un correcto seguimiento de par. En los recuadros señalados en la figura 4.97 muestra donde hay mayor error en el par, este problema se presentó los intervalos de $t = 0 - 0.5s$ y $t = 1.5 - 1.7s$ en ambos casos la velocidad se encontraba por debajo de los 400 RPM

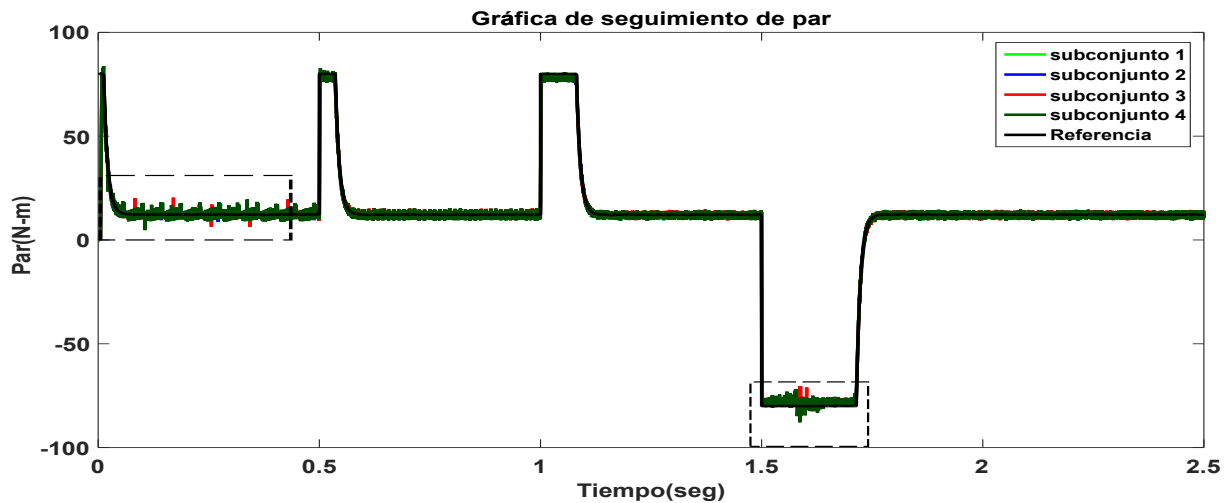


Figura 4.97: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 7.

En la figura 4.98 se muestra el comportamiento del par realizando un seguimiento de velocidad integrando dos factores de peso en la función de costo e incertidumbres en los parámetros del sistema con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En los recuadros señalados en la figura 4.98 se muestra que el sistema presentó en los mismos intervalos de tiempo un aumento en el error de par, sin embargo, un cambio que se puede apreciar es que al disminuir el tiempo de muestreo el error del par disminuye.

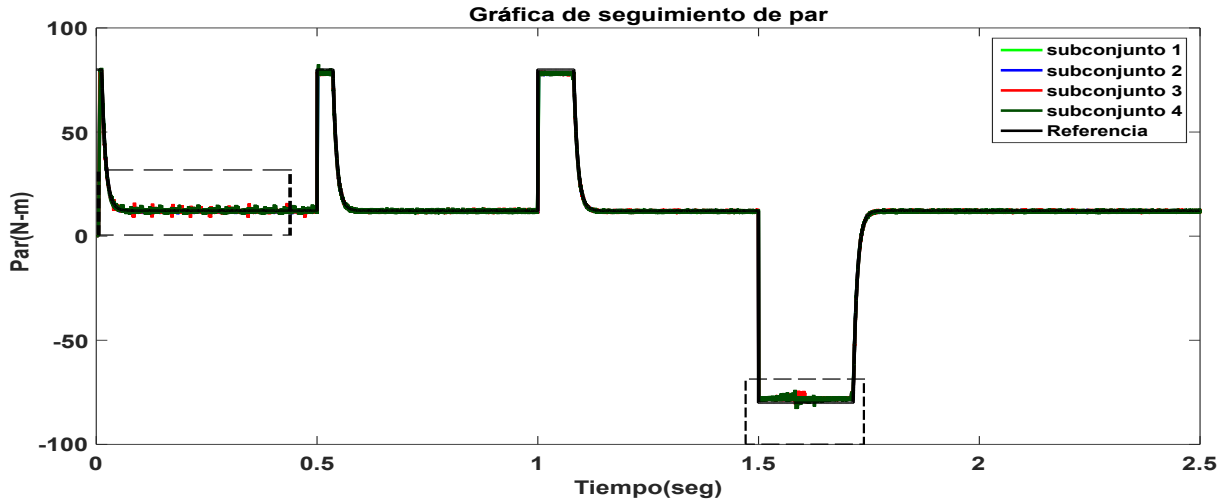


Figura 4.98: Seguimiento de par aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error. - Prueba 7.

En la tabla 4.37 se muestran los errores RMS del par, los resultados se presentan en tres intervalos de tiempo junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

Los resultados mostrados en la tabla 4.37 muestran que a pesar de que el sistema presenta incertidumbre en los parámetros, el control mantiene un correcto seguimiento de par y no hay un aumento o reducción significativo en el error con respecto a la prueba VI. Al igual que en la prueba anterior el mayor error del par se presentó en el subconjunto 3 y 4 en el intervalo $t = 0.1 - 0.5s$ donde la velocidad angular era de 100 RPM.

Resultados									
Prueba	Subconjunto de vectores	Error RMS del par con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del par con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de cálculos
		t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s		
6	Subconjunto 1	0.8379	0.8412	0.8419	0.4290	0.4222	0.4223	125	base
	Subconjunto 2	0.9588	0.8393	0.8339	0.4857	0.4318	0.4278	44	64.8%
	Subconjunto 3	1.3076	1.0251	0.9933	0.6631	0.5250	0.5106	32	74.4%
	Subconjunto 4	1.5891	1.2015	1.0420	0.7818	0.5190	0.5226	24	80.8%
7	Subconjunto 1	0.8826	0.8713	0.8613	0.5294	0.5119	0.5002	125	base
	Subconjunto 2	0.9883	0.8703	0.8717	0.5670	0.5130	0.5114	44	64.8%
	Subconjunto 3	1.2951	1.0442	1.0006	0.7173	0.5850	0.5642	32	74.4%
	Subconjunto 4	1.5528	1.1931	1.0366	0.8120	0.6431	0.5784	24	80.8%

Tabla 4.37: Error promedio de par y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 7.

Flujo en el estator ψ_s

En la figura 4.99 se muestra el comportamiento del flujo realizando un seguimiento de velocidad integrando dos factores de peso en la función de costo e incertidumbres en los parámetros del sistema con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. En la figura 4.99 se observa que a pesar de que el sistema presenta incertidumbres en los parámetros, el control mantiene un correcto seguimiento de flujo. En los recuadros de la figura 4.99 se logra apreciar que el mayor error en el flujo se presentó en los intervalos de $t = 0.1 - 0.5s$ y $t = 1.5 - 1.8s$, en ambos casos la velocidad se encuentra por debajo de los 400 RPM. Las distorsiones se presentaron para el sistema que evaluaba los subconjuntos 3 y 4.

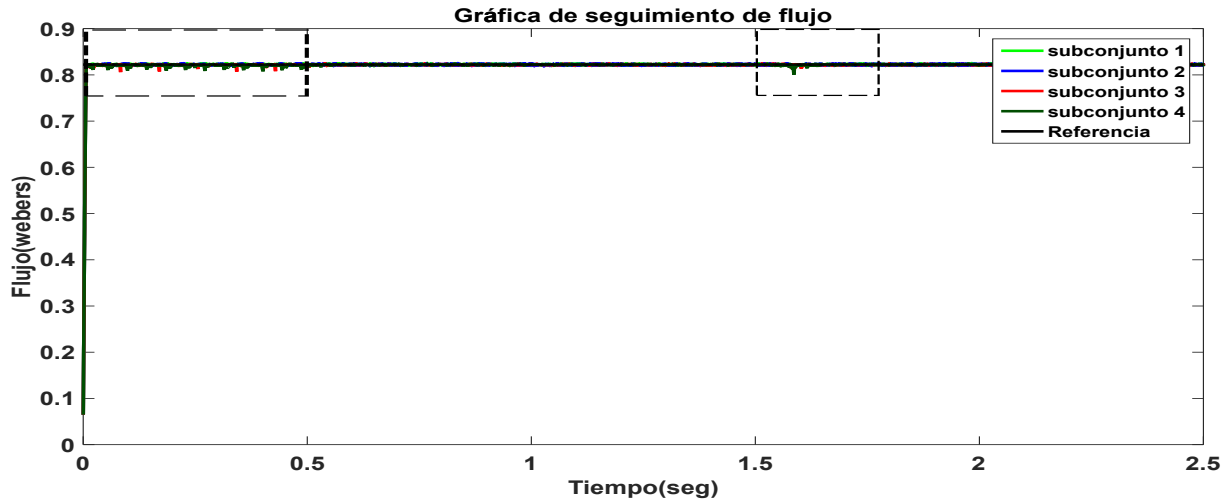


Figura 4.99: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 7.

En la figura 4.100 se muestra el comportamiento del flujo realizando un seguimiento de velocidad integrando dos factores de peso en la función de costo e incertidumbres en los parámetros del sistema con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. En los recuadros señalados en la figura 4.100 se muestra que el sistema presentó en los mismos intervalos de tiempo un aumento en el error de flujo, sin embargo, un cambio que se puede apreciar es que al disminuir el tiempo de muestreo el error del flujo aumenta.

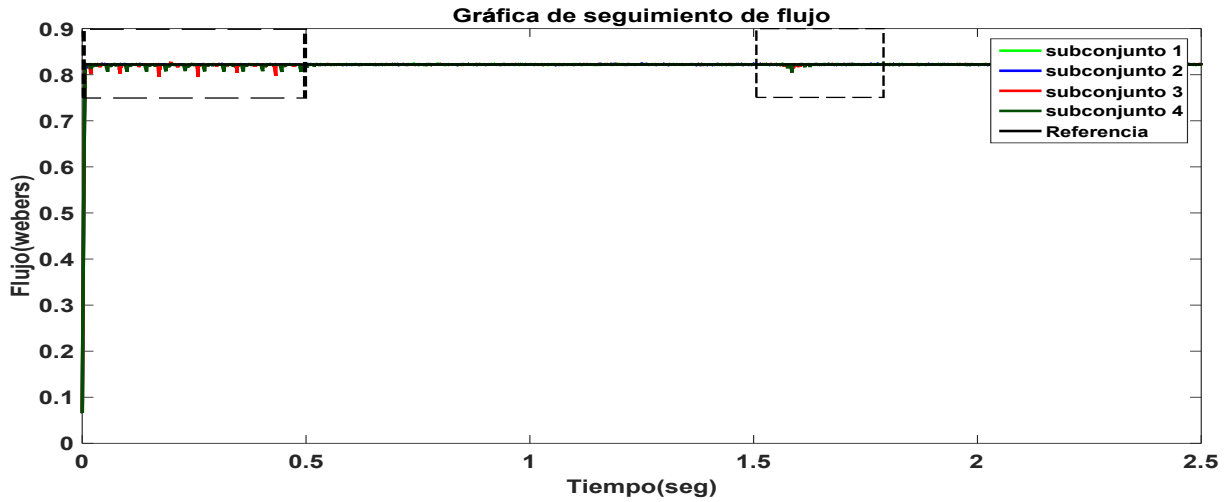


Figura 4.100: Seguimiento de flujo aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. Los recuadros señalan las zonas de mayor error.- Prueba 7.

En la tabla 4.38 se muestran los datos de los errores RMS de seguimiento del flujo, los resultados se presentan en tres intervalos de tiempo junto con los porcentajes de reducción de cálculos tomando como base el sistema que evalúa todos los vectores de tensión con tiempo de muestreo $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$.

Los resultados en la tabla 4.38 muestran que a pesar de que el sistema presenta incertidumbres en los parámetros, el control mantiene un correcto seguimiento de flujo y no hay un aumento o reducción significativo en el error con respecto a la prueba anterior. Al igual que en la prueba anterior el mayor error del flujo se presentó en el intervalo $t = 0.1 - 0.5s$, donde la velocidad angular era de 100 RPM.

Resultados									
Prueba	Subconjunto de vectores	Error RMS del flujo con $T_s = 100\mu s$			Error RMS del flujo con $T_s = 50\mu s$			Vectores evaluados	Reducción de cálculos
		t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s	t=0.1-0.5s	t=0.6-1s	t=2-2.5s		
6	Subconjunto 1	0.0018	0.0018	0.0018	0.0008	0.0008	0.0008	125	base
	Subconjunto 2	0.0020	0.0018	0.0018	0.0010	0.0008	0.0008	44	64.8%
	Subconjunto 3	0.0021	0.0015	0.0015	0.0016	0.0009	0.0008	32	74.4%
	Subconjunto 4	0.0028	0.0014	0.0014	0.0031	0.0007	0.0007	24	80.8%
7	Subconjunto 1	0.0017	0.0017	0.0017	0.0008	0.0008	0.0008	125	base
	Subconjunto 2	0.0020	0.0018	0.0017	0.0011	0.0008	0.0008	44	64.8%
	Subconjunto 3	0.0024	0.0014	0.0015	0.0031	0.0008	0.0007	32	74.4%
	Subconjunto 4	0.0035	0.0015	0.0014	0.0034	0.0008	0.0007	24	80.8%

Tabla 4.38: Error promedio de flujo y % de reducción de cálculos aplicando diferentes subconjuntos de vectores de tensión para un inversor de 5N - Prueba 7.

Tensiones en el estator V_s

A continuación, en la figura 4.101 y 4.102 se muestra las tensiones de salida del inversor evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$, respectivamente.

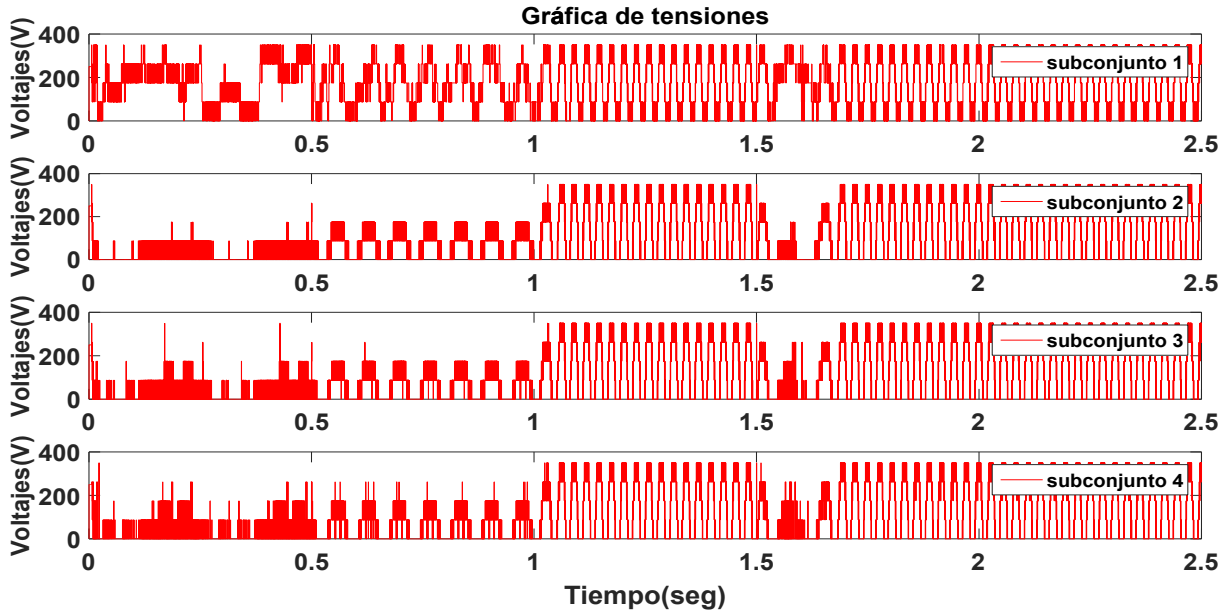


Figura 4.101: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 7.

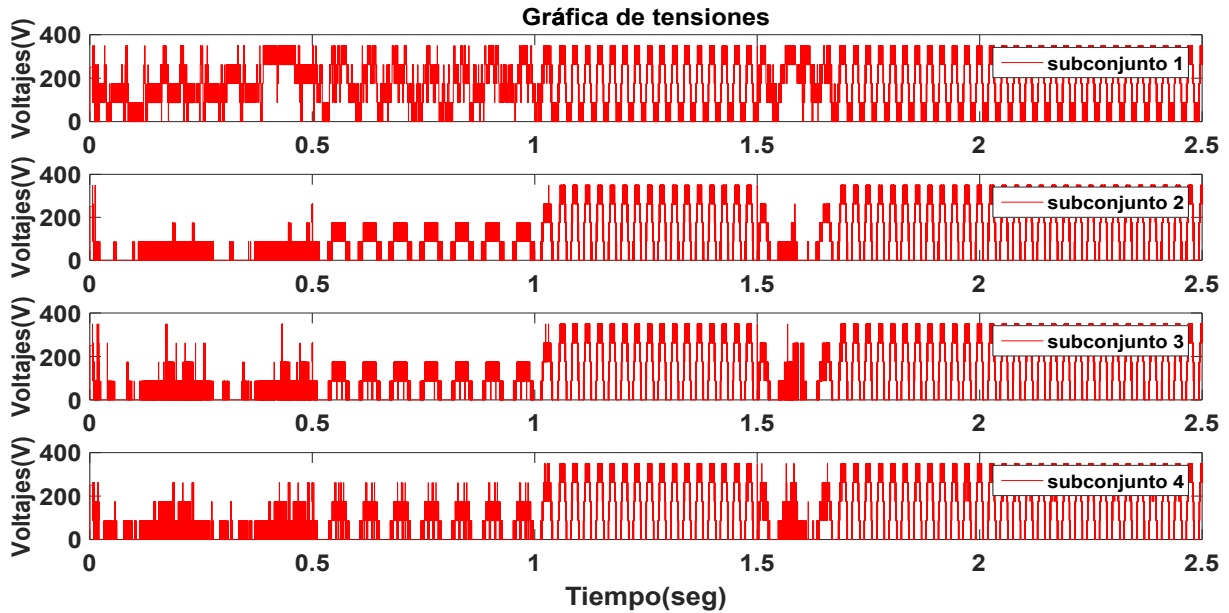


Figura 4.102: Tensiones de la fase a , aplicando FSC-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando diferentes subconjuntos de vectores con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 7.

En la tabla 4.39 se muestra el total de vectores a evaluar y su reducción en %; los resultados se comparan con el subconjunto 1. Los resultados muestran que al evaluar dos subconjuntos de vectores aumenta el número de operaciones, la reducción máxima que se tuvo fue de un 80.8% para el subconjunto 4.

Resultados			
Subconjunto	Número de vectores a evaluar	Reducción en operaciones	Reducción
Subconjunto 1	125	Base	Base
Subconjunto 2	44	81	64.8 %
Subconjunto 3	32	93	74.4 %
Subconjunto 4	24	101	80.8 %

Tabla 4.39: Total de vectores a evaluar y su reducción en % con respecto al caso base que evalúa todos los vectores de tensión - Prueba 7.

En la tabla 4.40 se muestra el número de conmutaciones por fase y el número de saltos en más de un nivel de tensión para cada subconjunto. Los resultados mostraron un aumento en el número de saltos de nivel y en el número de conmutaciones respecto a la prueba anterior.

Resultados													
Prueba	Subconjunto	Tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$						Tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$					
		Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión			Número de conmutaciones			Saltos en más de un nivel de tensión		
		Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c	Fase a	Fase b	Fase c
6	subconjunto 1	8308	8149	8148	13	10	8	16381	16016	16189	16	19	14
	subconjunto 2	10293	10065	10235	206	198	163	20277	19608	20018	366	296	316
	subconjunto 3	9692	9506	9662	359	339	348	18721	18326	18651	685	565	660
	subconjunto 4	9719	9600	9686	775	724	861	17814	17532	17761	1342	1100	1409
7	subconjunto 1	8197	8224	8213	8	10	11	16152	16116	15960	15	10	9
	subconjunto 2	10268	10064	10435	180	219	199	19974	19653	20472	338	308	342
	subconjunto 3	9567	9467	9742	393	379	413	18602	18487	18945	740	669	777
	subconjunto 4	9710	9704	9827	828	748	870	19370	19205	19609	1659	1542	1817

Tabla 4.40: Número de conmutaciones y número de saltos en más de un nivel de tensión - Prueba 7.

Corrientes en el estator i_{as} , i_{bs} , i_{cs}

En las figuras 4.103-4.106, se muestran las corrientes de fase, para el seguimiento de velocidad, integrando dos factores de peso en la función de costo e incertidumbres en los parámetros del sistema con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

En los recuadros señalados en las figuras 4.105 y 4.106 se puede observar que la mayor distorsión en las corrientes se presentó en el intervalo de $t = 0.1 - 0.5s$, este problema se presentó en el sistema que evalúa los subconjuntos 3 y 4. También se puede observar que al aumentar la velocidad la frecuencia aumenta y la distorsión disminuye.

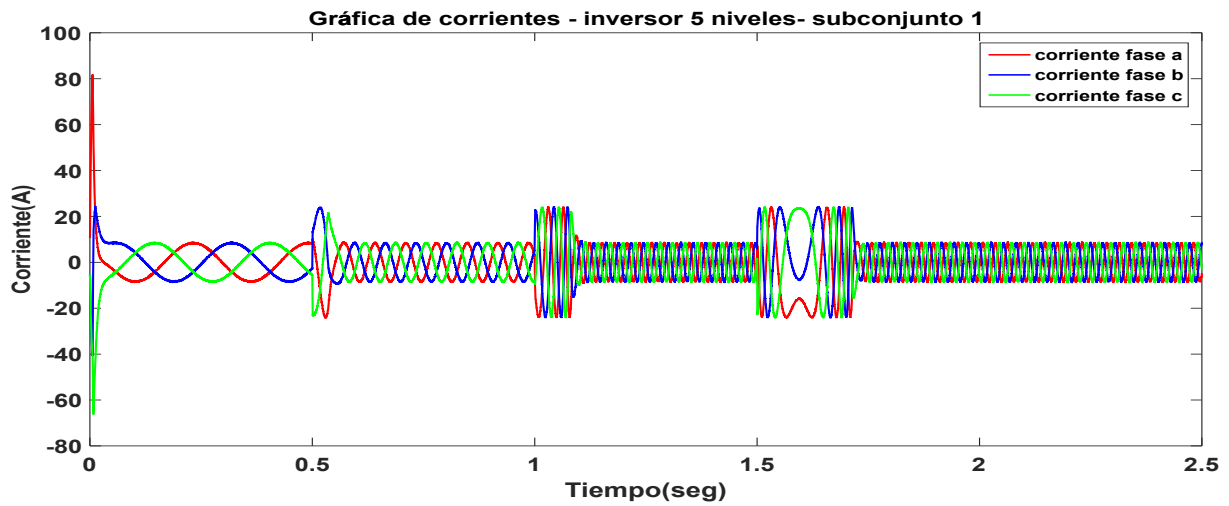


Figura 4.103: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 7.

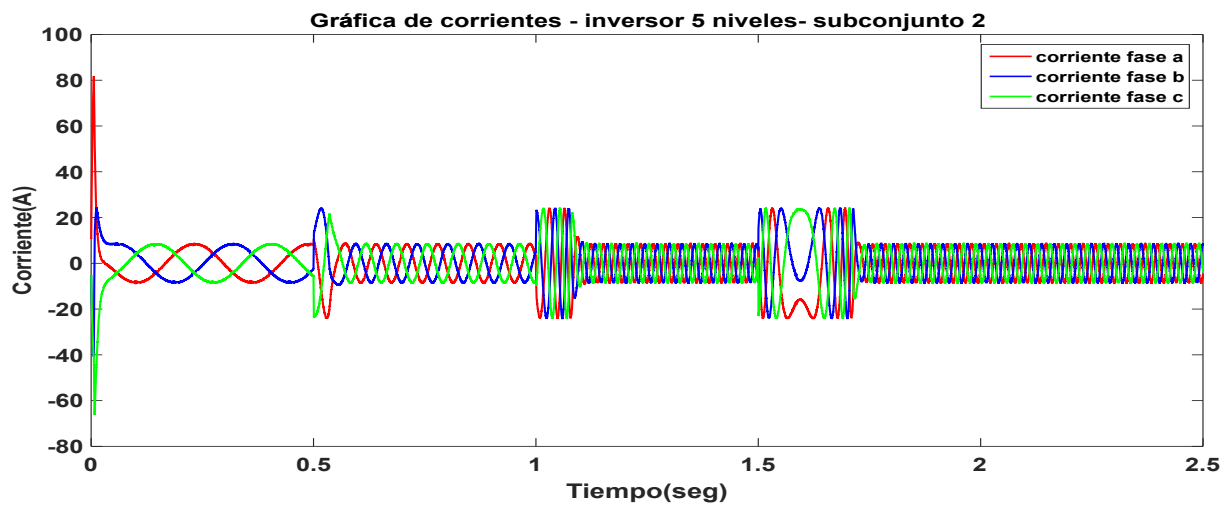


Figura 4.104: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$ - Prueba 7.

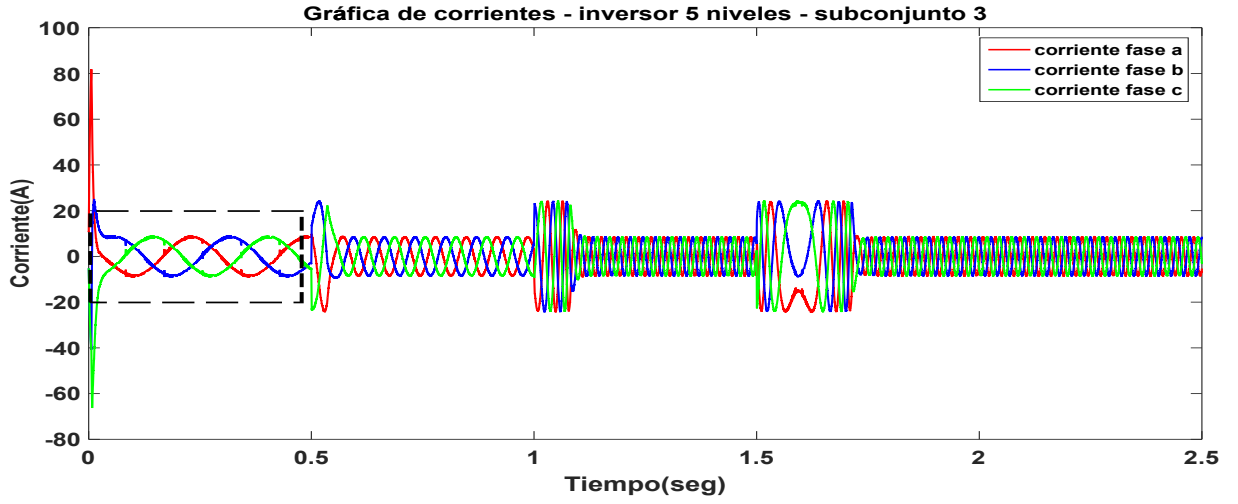


Figura 4.105: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 7.

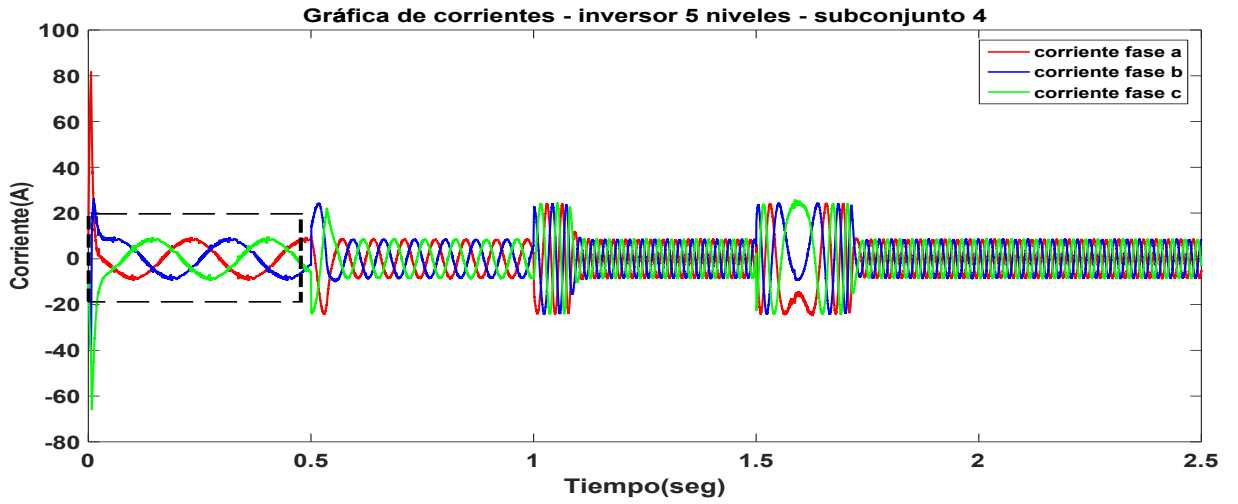


Figura 4.106: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 7.

En las figuras 4.107-4.110, se muestran las corrientes de fase, en el seguimiento de velocidad, integrando un factor de peso en la función de costo e incertidumbre en los parámetros del sistema con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$, los resultados de corriente para la fase *a* se muestran en color rojo, para la fase *b* en color azul y para la fase *c* en color verde.

Se observa que el sistema posee el mismo comportamiento respecto a la simulación anterior utilizando un tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$, sin embargo, el sistema con un $T_s = 50\mu s$ presenta una mayor distorsión en las corrientes. En el recuadro señalado en las figuras 4.109 y 4.110 muestra que la mayor distorsión se presentó en el intervalo de $t = 0.1 - 0.5s$ para el sistema que evalúa el subconjunto 3 y 4.

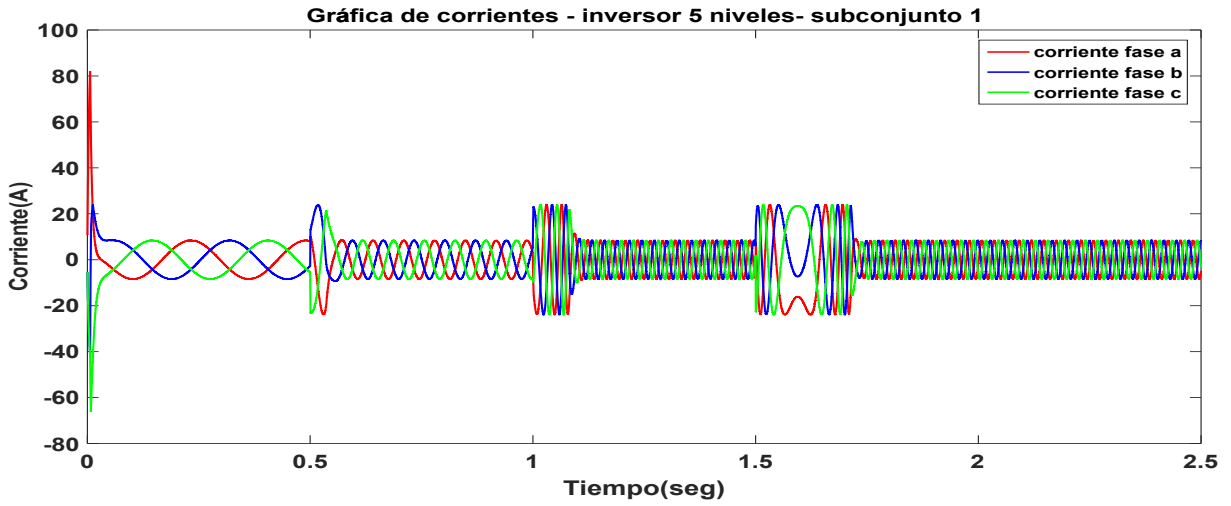


Figura 4.107: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 1 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 7.

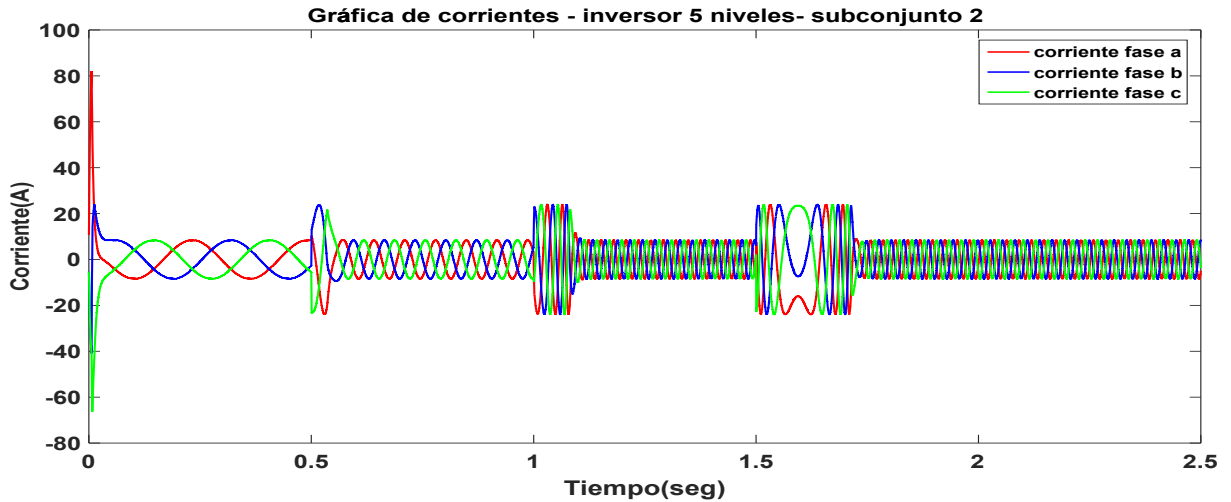


Figura 4.108: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 2 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$ - Prueba 7.

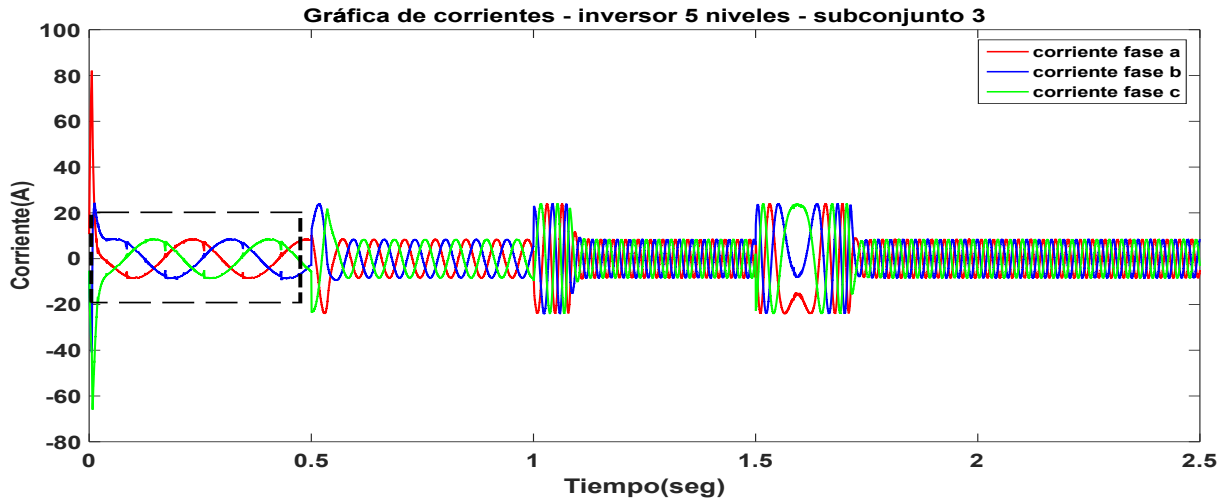


Figura 4.109: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 3 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 7.

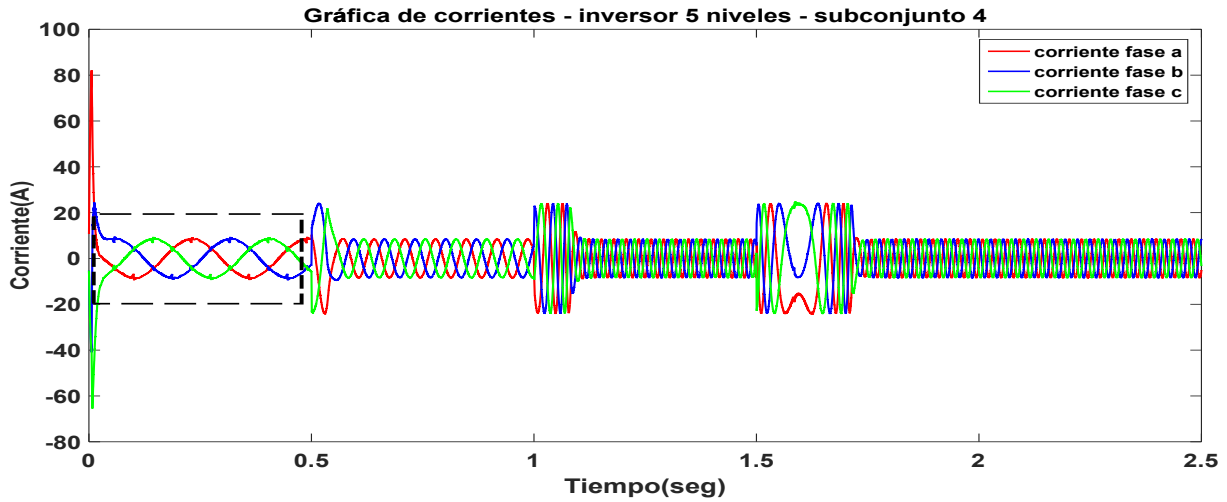


Figura 4.110: Corrientes de fase, aplicando FCS-MPC con un método de reducción de cálculos evaluando los vectores del subconjunto 4 con un tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$. El recuadro señala la zona de mayor error.- Prueba 7.

En la tabla 4.41 se muestran los valores de la distorsión armónica con su frecuencia fundamental y el valor del rizo máximo en las corrientes del estator para tiempos de muestreo de $T_s = 100\mu s$ y $T_s = 50\mu s$. Los resultados muestran un aumento en la distorsión en las corrientes, pero no se aprecia un aumento significativo en el rizo de las corrientes en comparación con la prueba anterior. Igual que en la prueba anterior la mayor distorsión en la corriente se presentó en el inter-

valo $t = 0.1 - 0.5s$ para el sistema que evalúa el subconjunto 3 y 4. Posteriormente los resultados muestran que en los siguientes intervalos los valores de la distorsión y el rizo se mantienen en magnitudes similares para cualquier subconjunto que se evalúe.

Resultados													
Prueba	Subconjunto	Tiempo de muestreo de $T_s = 100\mu s$						Tiempo de muestreo de $T_s = 50\mu s$					
		t=0.05-0.5s		t=0.6-0.1s		t=2-2.5s		t=0.05-0.5s		t=0.6-0.1s		t=2-2.5s	
		Ff= 4 Hz		Ff= 15 Hz		Ff= 35 Hz		Ff= 4 Hz		Ff= 15 Hz		Ff= 35 Hz	
		THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo	THD %	Rizo máximo
6	subconjunto 1	4.59	1.01 A	6.32	1.18 A	5.69	1.24 A	2.43	0.51 A	5.01	0.60 A	4.26	0.65 A
	subconjunto 2	4.84	1.13 A	6.27	1.21 A	5.56	1.22 A	2.64	0.63 A	5.04	0.61 A	4.13	0.66 A
	subconjunto 3	5.64	2.31 A	6.58	1.15 A	5.83	1.09 A	2.80	1.40 A	5.05	0.63 A	4.20	0.54 A
	subconjunto 4	6.8	2.08 A	6.48	1.37 A	5.65	1.13 A	5.51	1.05 A	5.15	0.69 A	4.14	0.57 A
7	subconjunto 1	7.4	0.99 A	7.39	1.17 A	6.73	1.21 A	6.36	0.50 A	6.41	0.59 A	5.34	0.63 A
	subconjunto 2	7.56	1.23 A	7.45	1.22 A	6.61	1.16 A	6.35	0.61 A	6.40	0.60 A	5.31	0.64 A
	subconjunto 3	8.10	2.26 A	7.45	1.12 A	6.54	1.06 A	8.2	1.54 A	6.44	0.55 A	5.10	0.51 A
	subconjunto 4	8.95	3.00 A	7.99	1.34 A	6.27	1.05 A	8.16	1.03 A	6.52	0.66 A	5.07	0.53 A

Tabla 4.41: Distorsión armónica y rizo máximo en las corrientes del estator - Prueba 7.

4.4. Conclusiones

Los resultados mostraron que las estrategias propuestas para reducir el costo computacional son eficientes, ya que se alcanzó una reducción de cálculos de hasta 90 % para el seguimiento del par y en el caso de cambio de giro y seguimiento de velocidad se alcanzó una reducción del 80 %, sin embargo, esta estrategia presentó ciertas implicaciones en otros aspectos, como se señalaran a continuación:

Prueba I: Los resultados mostraron que la implementación de la estrategia para la reducción de cálculos fue eficiente en el seguimiento de par sin embargo al evaluar menos vectores, implicaba un sobre impulso en el par al inicio de la prueba y un mayor tiempo en el transitorio del flujo.

Prueba II: Los resultados mostraron que establecer el flujo nominal antes de un cambio de par evitaba los sobre impulsos en el seguimiento del par, sin embargo, aún se presentaban los transitorios en el flujo.

Prueba III: Los resultados mostraron que integrar un factor de peso en la función de costo para dar más prioridad al flujo disminuye los transitorios del flujo y su error, sin embargo, esto hace que el error en el seguimiento del par aumente, también que aumente el número de saltos de nivel y la magnitud del rizo en las corrientes. Los resultados mostraron que la mayor distorsión en el par y en el flujo se presenta cuando la velocidad angular está por debajo de los 400 RPM.

Prueba IV: En esta prueba para lograr el cambio de giro se evaluaron dos subconjuntos a la vez ya que al disminuir la velocidad angular antes de invertir el giro del motor los vectores que están en θ_1 y θ_2 son requeridos con menor frecuencia, por lo tanto se necesita utilizar otro subconjunto de vectores que estén opuestos 180° al subconjunto definido, entonces el segundo subconjunto se define en el rango de θ_3 y θ_4 para que sean utilizados cuando la velocidad angular es negativa. Cabe mencionar que no se puede poner una condición, que cuando la velocidad angular es negativa, cambiar inmediatamente al otro subconjunto ya que el sistema aun requiere vectores

del otro subconjunto en bajas velocidades para poder invertir el giro, es por eso que el sistema requiere evaluar dos subconjuntos a la vez. Esta propuesta aumentó el doble el número de vectores a evaluar, sin embargo, se logra una reducción del 80% y los resultados de la prueba mostraron que el sistema sigue correctamente la referencia del par y flujo incluso en bajas velocidades y aun después de invertir el giro del rotor.

Prueba V: En esta prueba los resultados mostraron que la aplicación de la metodología FSC-MPC con la estrategia de reducción de cálculos evaluando dos subconjuntos e integrando un factor de peso en la función de costo, realiza correctamente el seguimiento de velocidad, sin embargo, en las pruebas realizadas se demostró que a bajas velocidades el error en el seguimiento del par y flujo es mayor, también se observó que al integrar un factor de peso para dar más prioridad al flujo genera mayor error en el par y más número de saltos de nivel, también se observó que a bajas velocidades el THD y la magnitud del rizo en las corrientes es mayor.

Prueba VI: Los resultados en las anteriores pruebas mostraron que al evaluar menor cantidad de vectores e integrar un factor de peso para dar prioridad al flujo, implicó que aumentarían el número de saltos de nivel, es por eso que en esta prueba se integró otro factor de costo en el cual toma en cuenta el nivel de tensión que se entregó un periodo anterior para poder disminuir el número de saltos de nivel, sin embargo, en esta prueba los resultados mostraron que dar prioridad a los saltos de nivel implicaba un aumento en el error del seguimiento del par y del flujo.

Prueba VII: Los resultados mostraron que a pesar de las incertidumbres en los parámetros del sistema el control mantenía un correcto seguimiento de velocidad, sin aumentar o disminuir los errores en el par o flujo. Sin embargo, hubo un aumento en el número de conmutaciones, saltos de nivel.

Los resultados mostraron que al disminuir el tiempo de muestreo los parámetros como el error del par y error del flujo disminuían un 50%, sin embargo, también aumentó el número de conmutaciones y los saltos de nivel al doble.

En la tabla 4.42 se presentan un resumen de los resultados de las pruebas de seguimiento de par y cambio de giro. Estos resultados se tomaron a velocidad nominal. Si en el seguimiento de par se compara la prueba 1 del capítulo 3 para el inversor de 4 niveles con respecto a la prueba 3 del capítulo 4, los resultados muestran que aplicando la estrategia para reducir el número de cálculos se tiene una mejor eficiencia en error de par, error de flujo y número de vectores a evaluar. Sin embargo, una desventaja de utilizar esta estrategia es el aumento en los saltos en más de un nivel de tensión.

Si en el cambio de giro se compara la prueba 2 del capítulo 3 para el inversor de 4 niveles con respecto a la prueba 4 del capítulo 4, los resultados muestran que aplicando la estrategia para reducir el número de cálculos evaluando 2 subconjuntos se tiene una menor eficiencia en error de par, pero mejor eficiencia en el error de flujo y número de vectores a evaluar. También, otra desventaja de utilizar esta estrategia es el aumento en los saltos en más de un nivel de tensión.

En la tabla 4.43 se presenta un resumen de las pruebas de seguimiento de velocidad. Si se compara la prueba 3 del capítulo 3 para el inversor de 4 niveles con respecto a la prueba 6 del capítulo 4, los resultados muestran que aplicando la estrategia para reducir el número de cálculos evaluando 2 subconjuntos e integrando dos factores de peso para dar prioridad al flujo y los saltos de nivel; se tiene una mejor eficiencia en el error de par, error de flujo, THD y número de vectores a evaluar. Sin embargo, una desventaja que se presentó es que el sistema tiene un gran número de saltos de nivel aún después de incluir un peso en la función de costo para disminuirlo. Tomando los datos de la prueba 7 del capítulo 4 los resultados muestran que a pesar de ciertas incertidumbres en los parámetros del sistema el control mantiene un correcto seguimiento de velocidad sin aumentar o disminuir los errores de par y de flujo.

La principal conclusión que se presenta en esta investigación es que la metodología de control FCS-MPC es muy flexible ya que se puede tener más de un objetivo de control y con la integración de un factor de peso el usuario puede decidir a qué variable se le puede poner mayor prioridad. Otra conclusión es que la metodología de reducción de cálculos la cual consiste en eliminación de

vectores redundantes y la selección de un subconjunto de vectores, es una buena estrategia para poder reducir los cálculos manteniendo las ventajas que puede otorgar un inversor multinivel.

Resultados seguimiento de par															
Capítulos	Prueba	Inversor	Subconjunto	Total de vectores a evaluar	Factor de peso en flujo	Tiempo de muestreo = 100 μ s					Tiempo de muestreo = 50 μ s				
						Error RMS del par	Error RMS del flujo	Total de conmutaciones	Total de saltos de nivel	Rizo máximo	Error RMS del par	Error RMS del flujo	Total de conmutaciones	Total de saltos de nivel	Rizo máximo
Capítulo 3	1	2 niveles	na	8	na	3.3262	0.0068	3657	na	3.78	1.6534	0.0035	7372	na	2.00
		3 niveles	na	27	na	1.6402	0.0036	3396	35	2.60	0.8283	0.0017	6771	83	1.35
		4 niveles	na	64	na	1.1176	0.0023	3117	60	1.71	0.5337	0.0012	6503	133	0.83
		5 niveles	na	125	na	0.8162	0.0018	3129	84	1.21	0.4125	0.0008	6306	189	0.66
Capítulo 4	1	5 niveles	subconjunto 1	125	na	0.8162	0.0018	3194	143	1.27	0.4125	0.0008	6314	223	0.66
			subconjunto 2	22	na	0.7926	0.0018	3051	84	1.35	0.4161	0.0008	6143	198	0.67
			subconjunto 3	16	na	0.8130	0.0018	3069	187	1.26	0.4251	0.0008	6202	435	0.65
			subconjunto 4	12	na	0.8459	0.0018	2993	280	1.18	0.3360	0.0008	5960	595	0.68
	2	5 niveles	subconjunto 1	125	na	0.8058	0.0018	3176	137	1.22	0.4127	0.0008	6311	184	0.68
			subconjunto 2	22	na	0.8276	0.0018	3062	72	1.23	0.4096	0.0008	6180	152	0.66
			subconjunto 3	16	na	0.8361	0.0018	3112	190	1.30	0.4159	0.0008	6231	393	0.73
			subconjunto 4	12	na	0.8477	0.0018	2969	203	1.38	0.4298	0.0008	5983	427	0.74
	3	5 niveles	subconjunto 1	125	na	0.8062	0.0018	3176	137	1.22	0.4127	0.0008	6311	184	0.68
			subconjunto 2	22	na	0.8280	0.0018	3062	72	1.23	0.4092	0.0008	6180	152	0.66
			subconjunto 3	16	1.4	0.8850	0.0015	3123	224	1.17	0.4381	0.0007	6181	451	0.63
			subconjunto 4	12	2.1	0.9734	0.0015	3217	373	1.13	0.4845	0.0007	6418	774	0.58
Resultados cambio de giro															
Capítulos	Prueba	Inversor	Subconjunto	Total de vectores a evaluar	Factor de peso en flujo	Tiempo de muestreo = 100 μ s					Tiempo de muestreo = 50 μ s				
						Error RMS del par	Error RMS del flujo	Total de conmutaciones	Total de saltos de nivel	Rizo máximo	Error RMS del par	Error RMS del flujo	Total de conmutaciones	Total de saltos de nivel	Rizo máximo
Capítulo 3	2	2 niveles	na	8	na	3.2323	0.0072	4387	na	3.89	1.6451	0.0035	8768	na	2.02
		3 niveles	na	27	na	1.5741	0.0036	4408	53	2.51	0.8886	0.0017	8436	69	1.35
		4 niveles	na	64	na	1.0875	0.0023	4277	97	1.77	0.5766	0.0012	8370	141	0.85
		5 niveles	na	125	na	0.8405	0.0018	4007	147	1.41	0.4826	0.0008	8099	258	0.70
Capítulo 4	4	5 niveles	Subconjunto 1	125	na	0.8405	0.0018	4140	172	1.36	0.3997	0.0008	8229	293	0.74
			Subconjunto 2	44	na	0.8179	0.0018	4041	130	1.40	0.4100	0.0008	8067	235	0.77
			Subconjunto 3	32	2	1.0413	0.0015	4243	415	1.25	0.5003	0.0007	8675	890	0.73
			Subconjunto 4	24	2.5	1.1973	0.0015	4438	676	1.32	0.8306	0.0007	7826	1040	0.71

Tabla 4.42: Resumen de resultados para el seguimiento de velocidad y cambio de giro

Resultados seguimiento de velocidad																		
Capítulos	Pruebas	Inversor	Subconjunto	Total de vectores a evaluar	Factor de peso en flujo	Factor de peso en saltos de nivel	Tiempo de muestreo = 100 μ s						Tiempo de muestreo = 50 μ s					
							Error RMS del par	Error RMS del flujo	THD en corrientes	Rizo Máximo	Total de conmutaciones	Total de saltos de nivel	Error RMS del par	Error RMS del flujo	THD en corrientes	Rizo Máximo	Total de conmutaciones	Total de saltos de nivel
Capítulo 3	3	2 niveles	na	8	na	na	3.7021	0.0063	18.7	3.98	20054	na	1.8691	0.0031	9.56	2.07	40786	na
		3 niveles	na	27	na	na	1.9050	0.0030	9.37	2.22	25219	274	0.9617	0.0015	5.79	1.08	50738	529
		4 niveles	na	64	na	na	1.2735	0.0020	7.0	1.55	27161	345	0.6457	0.0009	4.6	0.85	53747	708
		5 niveles	na	125	na	na	0.9740	0.0015	5.85	1.30	29162	653	0.4944	0.0007	4.15	0.66	58027	1071
Capítulo 4	5	5 niveles	subconjunto 1	125	na	na	0.8351	0.0018	5.85	1.31	32235	1269	0.4193	0.0008	4.15	0.64	64242	1806
			subconjunto 2	44	na	na	0.8266	0.0018	5.9	1.25	31495	764	0.4168	0.0008	4.25	0.67	60829	1438
			subconjunto 3	32	2	na	0.9637	0.0015	5.91	1.13	29867	1101	0.4861	0.0008	4.17	0.56	59910	2390
			subconjunto 4	24	2.5	na	1.0235	0.0014	5.92	1.11	29565	2416	0.5174	0.0008	4.07	0.57	54087	3979
	6	5 niveles	subconjunto 1	125	na	0.001	0.8419	0.0018	5.69	1.24	24600	31	0.4223	0.0008	4.26	0.65	46586	49
			subconjunto 2	44	na	0.001	0.8339	0.0018	5.56	1.22	30594	567	0.4278	0.0008	4.13	0.66	59903	978
			subconjunto 3	32	2	0.001	0.9933	0.0015	5.83	1.09	28860	1046	0.5106	0.0009	4.20	0.54	55698	2001
			subconjunto 4	24	2.5	0.001	1.0420	0.0014	5.65	1.13	29005	2360	0.5226	0.0009	4.14	0.57	53007	3851
			Resultados de seguimiento de velocidad con incertidumbre en parámetros del sistema															
Capítulos	Pruebas	Inversor	Subconjunto	Total de vectores a evaluar	Factor de peso en flujo	Factor de peso en saltos de nivel	Tiempo de muestreo = 100 μ s						Tiempo de muestreo = 50 μ s					
							Error RMS del par	Error RMS del flujo	THD en corrientes	Rizo máximo	Total de conmutaciones	Total de saltos de nivel	Error RMS del par	Error RMS del flujo	THD en corrientes	Rizo máximo	Total de conmutaciones	Total de saltos de nivel
Capítulo 4	7	5 niveles	Subconjunto 1	125	na	0.001	0.8613	0.0017	6.73	1.21	24634	29	0.5005	0.0008	5.34	0.63	48228	34
			Subconjunto 2	44	na	0.001	0.8717	0.0017	6.61	1.16	30767	598	0.5114	0.0008	5.31	0.64	60099	988
			Subconjunto 3	32	2	0.001	1.0006	0.0015	6.54	1.06	28776	1185	0.5642	0.0007	5.10	0.51	56034	2186
			Subconjunto 4	24	2.5	0.001	1.0366	0.0014	6.27	1.05	29241	2446	0.5782	0.0007	5.7	0.53	58184	5018

Tabla 4.43: Resumen de resultados para el seguimiento de velocidad

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Entre las diversas aplicaciones que se le pueden dar a los convertidores multinivel, el control de las máquinas eléctricas es un campo que ha ganado mucho interés. El principio de operación de estos sistemas es simple, sin embargo, para que estos sistemas sean capaces de convertir y transferir la mayor cantidad de energía disponible requieren que los equipos y dispositivos que los conforman sean robustos y versátiles, además, necesitan contar con esquemas de control para optimizar su aprovechamiento.

Durante las últimas décadas, los avances en la teoría de control moderno y microprocesadores han permitido aplicar la metodología FCS-MPC en los sistemas híbridos de una manera natural y simple para alimentar a diferentes unidades eléctricas. Este método, como se mostró, ofrece una gran flexibilidad para administrar diferentes objetivos sin agregar una complejidad significativa, el control FSC-MPC ha demostrado ser una alternativa moderna, atractiva y competitiva para el control de máquinas eléctricas alimentadas por convertidores estáticos de potencia.

En particular es bien sabido que esta nueva metodología de control FSC-MPC posee la desventaja de ser muy demandante computacionalmente al tener un número muy grande de entradas que evaluar, es por eso que en este trabajo de investigación se propuso un método de reducción de cálculos para hacer mas eficiente la selección de la entrada de control evitando perjudicar los objetivos de control propuestos.

Al final, esta metodología FCS-MPS puede aportar avances a la forma en que se controla la energía eléctrica mediante convertidores estáticos de potencia y ofrece oportunidades desafiantes para la investigación en máquinas eléctricas y accionamientos.

En este capítulo se muestran las conclusiones, aportaciones y algunas recomendaciones a trabajos futuros sobre este tema de investigación.

5.1. Conclusiones

En este trabajo se desarrollaron estrategias de control FCS-MPC para un motor de inducción alimentado por inversores multinivel de 3, 4 y 5 niveles, además se realiza la propuesta e implementación de un método que minimiza la carga computacional demandada por la metodología de control propuesta.

Con respecto al control FCS-MPC se recabaron estas conclusiones

- Como se presentó, el FSC-MPC permite tratar a los sistemas no lineales de una manera conceptual simple, ya que solo requiere un modelo de predicción y una función de costo donde se incluyen los objetivos con muy pocos parámetros de sintonización a diferencia de otras metodologías.
- A mayor número de niveles, se mejora el desempeño del sistema en términos de las variables a controlar. El convertidor multinivel de 5 niveles logra el mejor desempeño comparado con inversores de menor número de niveles.
- A mayor número de niveles que posea el inversor más lento se vuelve el algoritmo para elegir la entrada de control que minimice el error entre los objetivos.
- La función de costo pudo abordar diferentes objetivos de control como lo es el par y flujo, tal como se demostró en este trabajo.

- A mayor número de niveles que posea menor es la distorsión THD que presentaban las corrientes del estator.

Con respecto al algoritmo de reducción de cálculos se presentan las siguientes conclusiones:

- El subconjunto de vectores que se encontraban normalmente de 70° a 110° del vector de flujo $\vec{\psi}_s$ fueron los que permitieron reducir el número de cálculos y mantener los objetivos de control el par y el flujo.
- Al evaluar diferentes subconjuntos de vectores se redujo el número de cálculos, sin embargo, causa un sobre impulso en el par y mayor tiempo en el transitorio del flujo, sin embargo, no aumenta el error en los objetivos de control.
- Mantener en flujo nominal antes de un cambio de referencia de par (al inicio de la prueba) reduce los sobre impulsos de par y saltos de nivel de tensión, pero no reduce los transitorios del flujo a bajas velocidades.
- Integrar un factor de peso en la función de costo reduce los transitorios del flujo y es una solución práctica, sin embargo, aumenta el error en otras variables como el par y el número de saltos de nivel.
- Evaluar dos subconjuntos permite realizar correctamente un cambio de giro en la velocidad angular. Evaluando dos subconjuntos aumenta el número de cálculos sin embargo se tiene una reducción del 80 % con respecto al inversor de 5 niveles.
- Evaluar dos subconjuntos permite realizar correctamente un seguimiento de velocidad angular. También integrar el factor de peso en la función de costo permite, además, reducir el transitorio del flujo en bajas velocidades.
- Integrar un factor de peso en la función de costo para reducir el numero de conmutaciones, aumenta el error en el seguimiento del par.
- A pesar de integrar incertidumbres en los elementos del sistema, el control realizaba un correcto seguimiento de velocidad, sin aumentar los errores del par y flujo.

La principal conclusión que se presenta en esta investigación es que la metodología de control FCS-MPC es muy flexible ya que se puede integrar más de un objetivo de control y con la integración de un factor de peso el usuario puede decidir a qué variable se le puede poner mayor prioridad. Otra conclusión es que la metodología de reducción de cálculos la cual consiste en eliminación de vectores redundantes y la selección de un subconjunto de vectores es una solución simple para poder reducir los cálculos sin dejar de aprovechar las ventajas que puede otorgar un inversor multinivel.

5.2. Aportaciones

Con la realización de este trabajo de investigación, las principales aportaciones son:

- Desarrollo de controladores basados en FCS-MPC, para el control de par y flujo en una máquina de inducción alimentada por convertidores multinivel.
- Desarrollo de un método de reducción de cálculos tomando diferentes subconjuntos de vectores de tensión que puede aportar en inversor.
- Restricción de saltos entre los gradientes de tensión que induce el inversor hacia el motor.
- Se realiza una estrategia para el control de la inversión de giro, frenando a la máquina paso a paso mediante el uso de diversos subconjuntos de vectores de tensión.
- Integración de un factor de peso en la función de costo para dar mayor prioridad a otras variables como el flujo y los saltos de nivel de tensión.
- Las estrategias desarrolladas son generales, y pudieran ser aplicadas con cualesquiera de las topologías de conversión multinivel que existen como Capacitores Flotantes, Neutro Fijo por Diodos Fijos o Puentes H-en Cascada.

5.3. Recomendaciones para trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos con el desarrollo de este trabajo, las recomendaciones para futuros trabajos en esta área del conocimiento son:

- Llevar el control a fase experimental y comparar los resultados con las simulaciones mostradas.
- Realizar un estimador para el motor de inducción ya que en la implementación algunos estados no están disponibles como lo es el flujo del rotor.
- Mejorar la respuesta en estado estable realizando predicciones de los estados $(k + N)$ con horizontes extendidos mayores a $N > 1$.
- Mejorar los transitorios en bajas velocidades.
- Realizar un procedimiento más eficiente en el cambio de giro.

Apéndice A

Inversores multinivel

En este apéndice se presenta las funciones de conmutación, los valores de magnitud y ángulo ala hora de cambio de cuadratura de abc a $qd0$ para cada inversor de 2, 3, 4 y 5 niveles.

A.1. Inversor 2 niveles

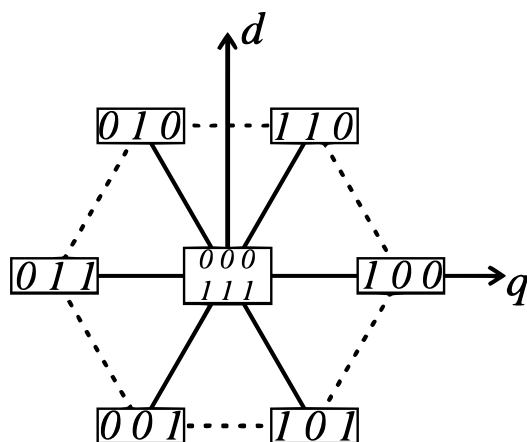


Figura A.1: Vectores de tensión en plano $dq0$ para convertidor trifásico de 2-niveles

Función de conmutación			Valores de tensión marco $qd0$				
S_a	S_b	S_c	No	v_q	v_d	Magnitud	Ángulo
0	0	0	\vec{V}_{s0}	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	0°
1	0	0	\vec{V}_{s1}	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	0°
1	1	0	\vec{V}_{s2}	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	60°
0	1	0	\vec{V}_{s3}	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	120°
0	1	1	\vec{V}_{s4}	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	180°
0	0	1	\vec{V}_{s5}	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	240°
1	0	1	\vec{V}_{s6}	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	300°
1	1	1	\vec{V}_{s7}	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	0°

Tabla A.1: Estados de conmutación y vectores de tensión para inversor trifásico 2-niveles.

A.2. Inversor 3 niveles

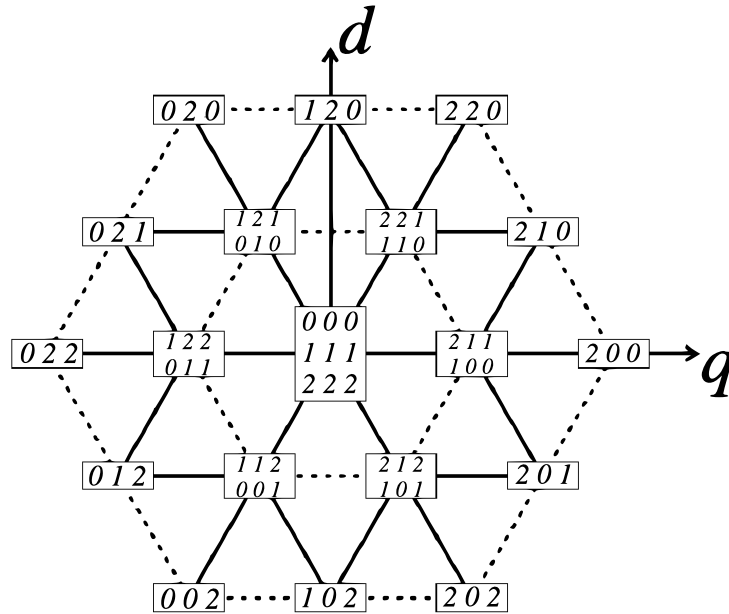


Figura A.2: Vectores de tensión en plano $dq0$ para convertidor trifásico de 3-niveles

Función de conmutación			Valores de tensión marco $qd0$				
S_a	S_b	S_c	No	v_q	v_d	Magnitud	Ángulo
2	2	2	\vec{V}_{s0}	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	0°
1	1	1	\vec{V}_{s1}				
0	0	0	\vec{V}_{s2}				
2	1	1	\vec{V}_{s3}	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	0°
1	0	0	\vec{V}_{s4}				
2	2	1	\vec{V}_{s5}	$\frac{1}{6}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	60°
1	1	0	\vec{V}_{s6}				
1	2	1	\vec{V}_{s7}	$-\frac{1}{6}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	120°
0	1	0	\vec{V}_{s8}				
1	2	2	\vec{V}_{s9}	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	180°
0	1	1	\vec{V}_{s10}				

1	1	2	$\overrightarrow{V_{s11}}$	$-\frac{1}{6}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	240°
0	0	1	$\overrightarrow{V_{s12}}$				
2	1	2	$\overrightarrow{V_{s13}}$	$\frac{1}{6}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	300°
1	0	1	$\overrightarrow{V_{s14}}$				
2	0	0	$\overrightarrow{V_{s15}}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	0°
2	1	0	$\overrightarrow{V_{s16}}$	$\frac{1}{2}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{6}V_{dc}$	30°
2	2	0	$\overrightarrow{V_{s17}}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	60°
1	2	0	$\overrightarrow{V_{s18}}$	$0V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	90°
0	2	0	$\overrightarrow{V_{s19}}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	120°
0	2	1	$\overrightarrow{V_{s20}}$	$-\frac{1}{2}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{6}V_{dc}$	150°
0	2	2	$\overrightarrow{V_{s21}}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	180°
0	1	2	$\overrightarrow{V_{s22}}$	$-\frac{1}{2}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{6}V_{dc}$	210°
0	0	2	$\overrightarrow{V_{s23}}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	240°
1	0	2	$\overrightarrow{V_{s24}}$	$0V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	270°
2	0	2	$\overrightarrow{V_{s25}}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	300°
2	0	1	$\overrightarrow{V_{s26}}$	$\frac{1}{2}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{6}V_{dc}$	330°

Tabla A.2: Estados de conmutación y vectores de tensión para inversor trifásico 3-niveles.

A.3. Inversor 4 niveles

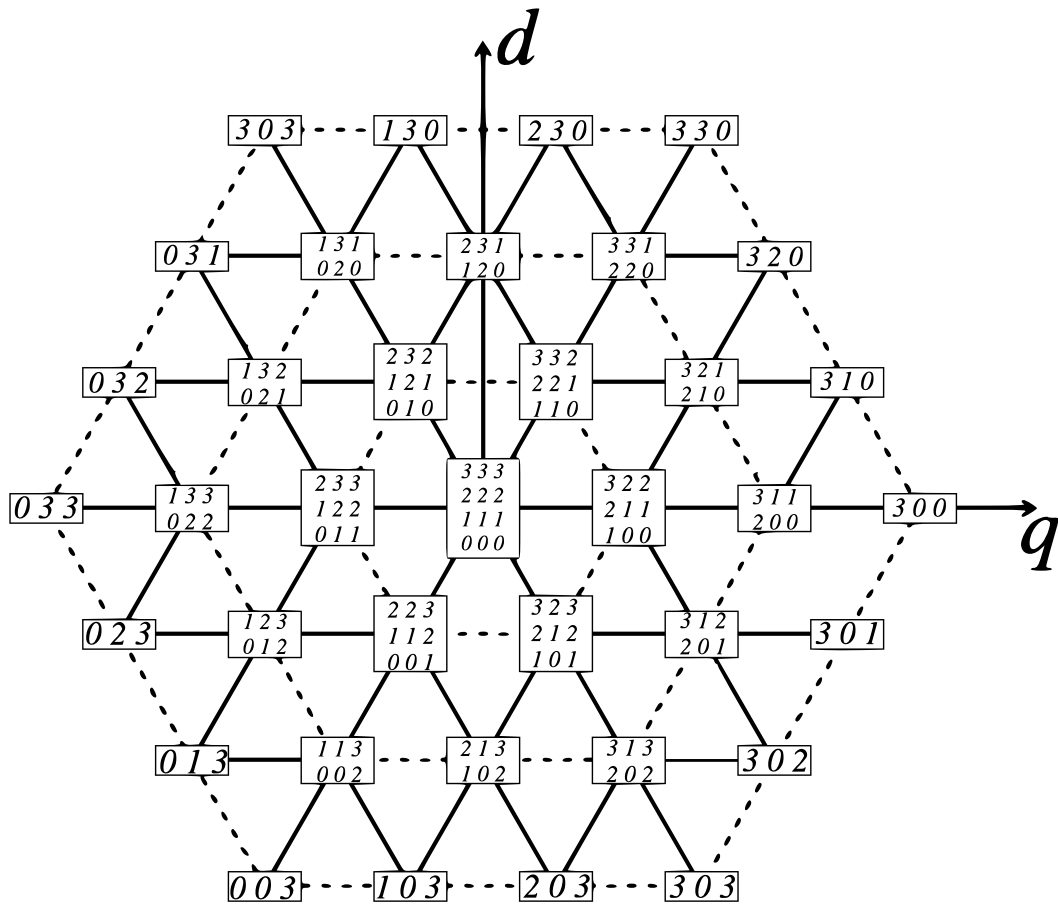


Figura A.3: Vectores de tensión en plano $dq0$ para convertidor trifásico de 4-niveles

Función de conmutación			Valores de tensión marco $qd0$				
S_a	S_b	S_c	No	v_q	v_d	Magnitud	Ángulo
3	3	3	\vec{V}_{s0}	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	0°
2	2	2	\vec{V}_{s1}				
1	1	1	\vec{V}_{s2}				
0	0	0	\vec{V}_{s3}				
3	2	2	\vec{V}_{s4}	$\frac{2}{9}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{9}V_{dc}$	0°
2	1	1	\vec{V}_{s5}				

1	0	0	$\overrightarrow{V_{s6}}$				
3	3	2	$\overrightarrow{V_{s7}}$	$\frac{1}{9}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{2}{9}V_{dc}$	60°
2	2	1	$\overrightarrow{V_{s8}}$				
1	1	0	$\overrightarrow{V_{s9}}$				
2	3	2	$\overrightarrow{V_{s10}}$	$\frac{1}{9}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{2}{9}V_{dc}$	120°
1	2	1	$\overrightarrow{V_{s11}}$				
0	1	0	$\overrightarrow{V_{s12}}$				
2	3	3	$\overrightarrow{V_{s13}}$	$-\frac{2}{9}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{9}V_{dc}$	180°
1	2	2	$\overrightarrow{V_{s14}}$				
0	1	1	$\overrightarrow{V_{s15}}$				
2	2	3	$\overrightarrow{V_{s16}}$	$-\frac{1}{9}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{2}{9}V_{dc}$	240°
1	1	2	$\overrightarrow{V_{s17}}$				
0	0	1	$\overrightarrow{V_{s18}}$				
3	2	3	$\overrightarrow{V_{s19}}$	$\frac{1}{9}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{2}{9}V_{dc}$	300°
2	1	2	$\overrightarrow{V_{s20}}$				
1	0	1	$\overrightarrow{V_{s21}}$				
3	1	1	$\overrightarrow{V_{s22}}$	$\frac{4}{9}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{4}{9}V_{dc}$	0°
2	0	0	$\overrightarrow{V_{s23}}$				
3	2	1	$\overrightarrow{V_{s24}}$	$\frac{3}{9}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{12}}{9}V_{dc}$	30°
2	1	0	$\overrightarrow{V_{s25}}$				
3	3	1	$\overrightarrow{V_{s26}}$	$\frac{2}{9}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{4}{9}V_{dc}$	60°
2	2	0	$\overrightarrow{V_{s27}}$				
2	3	1	$\overrightarrow{V_{s28}}$	$0V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{9}V_{dc}$	90°
1	2	0	$\overrightarrow{V_{s29}}$				
1	3	1	$\overrightarrow{V_{s30}}$	$\frac{2}{9}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{4}{9}V_{dc}$	120°
0	2	0	$\overrightarrow{V_{s31}}$				
1	3	2	$\overrightarrow{V_{s32}}$	$\frac{3}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{9}V_{dc}$	150°
0	2	1	$\overrightarrow{V_{s33}}$				

1	3	3	$\overrightarrow{V_{s34}}$	$-\frac{4}{9}V_{dc}$	0	$\frac{4}{9}V_{dc}$	180°
0	2	2	$\overrightarrow{V_{s35}}$				
1	2	3	$\overrightarrow{V_{s36}}$	$-\frac{3}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{9}V_{dc}$	210°
0	1	2	$\overrightarrow{V_{s37}}$				
1	1	3	$\overrightarrow{V_{s38}}$	$-\frac{2}{9}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{4}{9}V_{dc}$	240°
0	0	2	$\overrightarrow{V_{s39}}$				
2	1	3	$\overrightarrow{V_{s40}}$	$0V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{9}V_{dc}$	270°
1	0	2	$\overrightarrow{V_{s41}}$				
3	1	3	$\overrightarrow{V_{s42}}$	$-\frac{2}{9}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{4}{9}V_{dc}$	300°
2	0	2	$\overrightarrow{V_{s43}}$				
3	1	2	$\overrightarrow{V_{s44}}$	$-\frac{3}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{9}V_{dc}$	330°
2	0	1	$\overrightarrow{V_{s45}}$				
3	0	0	$\overrightarrow{V_{s46}}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	0°
3	1	0	$\overrightarrow{V_{s47}}$	$\frac{5}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	20°
3	2	0	$\overrightarrow{V_{s48}}$	$\frac{4}{9}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	40°
3	3	0	$\overrightarrow{V_{s49}}$	$\frac{3}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	60°
2	3	0	$\overrightarrow{V_{s50}}$	$\frac{1}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	80°
1	3	0	$\overrightarrow{V_{s51}}$	$-\frac{1}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	100°
0	3	0	$\overrightarrow{V_{s52}}$	$-\frac{3}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	120°
0	3	1	$\overrightarrow{V_{s53}}$	$-\frac{4}{9}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	140°
0	3	2	$\overrightarrow{V_{s54}}$	$-\frac{5}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	160°
0	3	3	$\overrightarrow{V_{s55}}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	180°
0	2	3	$\overrightarrow{V_{s56}}$	$-\frac{5}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	200°
0	1	3	$\overrightarrow{V_{s57}}$	$-\frac{4}{9}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	220°
0	0	3	$\overrightarrow{V_{s58}}$	$-\frac{3}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	240°
1	0	3	$\overrightarrow{V_{s59}}$	$-\frac{1}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	260°
2	0	3	$\overrightarrow{V_{s60}}$	$\frac{1}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	280°

3	0	3	$\overrightarrow{V_{s61}}$	$-\frac{3}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	300°
3	0	2	$\overrightarrow{V_{s62}}$	$-\frac{4}{9}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	320°
3	0	1	$\overrightarrow{V_{s63}}$	$-\frac{5}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{9}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{9}V_{dc}$	340°

Tabla A.3: Estados de conmutación y vectores de tensión para inversor trifásico 4-niveles.

A.4. Inversor 5 niveles

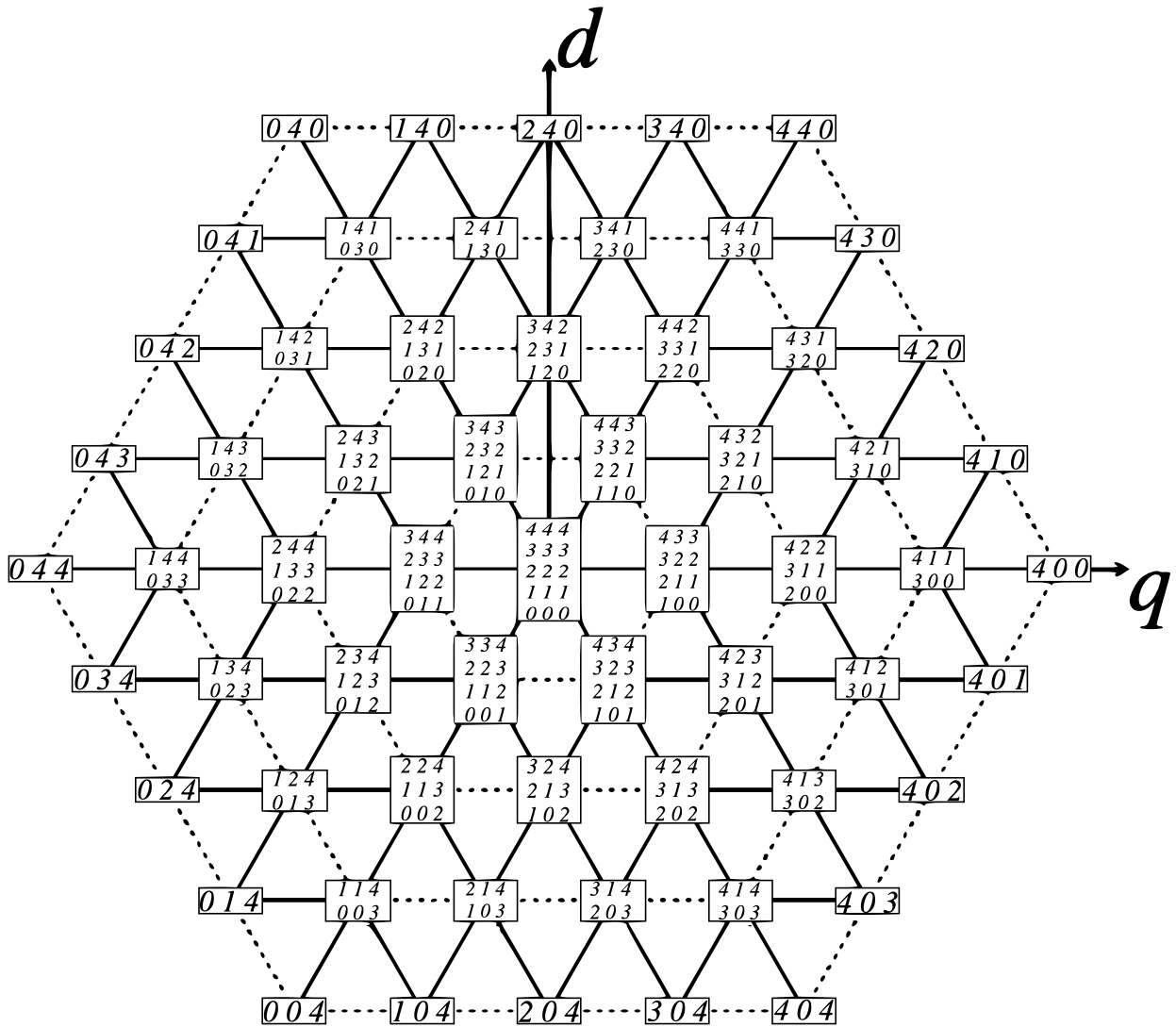


Figura A.4: Vectores de tensión en plano $dq0$ para convertidor trifásico de 5-niveles

Función de conmutación			Valores de tensión marco $qd0$				
S_a	S_b	S_c	No	v_q	v_d	Magnitud	Ángulo
4	4	4	\vec{V}_{s0}	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	$0V_{dc}$	0°
3	3	3	\vec{V}_{s1}				
2	2	2	\vec{V}_{s2}				
1	1	1	\vec{V}_{s3}				
0	0	0	\vec{V}_{s4}				
4	3	3	\vec{V}_{s5}	$\frac{2}{12}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{12}V_{dc}$	0°
3	2	2	\vec{V}_{s6}				
2	1	1	\vec{V}_{s7}				
1	0	0	\vec{V}_{s8}				
4	4	3	\vec{V}_{s9}	$\frac{1}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{2}{12}V_{dc}$	60°
3	3	2	\vec{V}_{s10}				
2	2	1	\vec{V}_{s11}				
1	1	0	\vec{V}_{s12}				
3	4	3	\vec{V}_{s13}	$-\frac{1}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{2}{12}V_{dc}$	120°
2	3	2	\vec{V}_{s14}				
1	2	1	\vec{V}_{s15}				
0	1	0	\vec{V}_{s16}				
3	4	4	\vec{V}_{s17}	$-\frac{2}{12}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{12}V_{dc}$	180°
2	3	3	\vec{V}_{s18}				
1	2	2	\vec{V}_{s19}				
0	1	1	\vec{V}_{s20}				
3	3	4	\vec{V}_{s21}	$-\frac{1}{12}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{2}{12}V_{dc}$	240°
2	2	3	\vec{V}_{s22}				
1	1	2	\vec{V}_{s23}				
0	0	1	\vec{V}_{s24}				

4	3	4	$\overrightarrow{V_{s25}}$	$\frac{1}{12} V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12} V_{dc}$	$\frac{2}{12} V_{dc}$	300°
3	2	3	$\overrightarrow{V_{s26}}$				
2	1	2	$\overrightarrow{V_{s27}}$				
1	0	1	$\overrightarrow{V_{s28}}$				
4	2	2	$\overrightarrow{V_{s29}}$	$\frac{4}{12} V_{dc}$	$0 V_{dc}$	$\frac{4}{12} V_{dc}$	0°
3	1	1	$\overrightarrow{V_{s30}}$				
2	0	0	$\overrightarrow{V_{s31}}$				
4	3	2	$\overrightarrow{V_{s32}}$	$\frac{3}{12} V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{12} V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{12} V_{dc}$	30°
3	2	1	$\overrightarrow{V_{s33}}$				
2	1	0	$\overrightarrow{V_{s34}}$				
4	4	2	$\overrightarrow{V_{s35}}$	$\frac{2}{12} V_{dc}$	$2 \frac{\sqrt{3}}{12} V_{dc}$	$\frac{\sqrt{16}}{12} V_{dc}$	60°
3	3	1	$\overrightarrow{V_{s36}}$				
2	2	0	$\overrightarrow{V_{s37}}$				
3	4	2	$\overrightarrow{V_{s38}}$	$0 V_{dc}$	$2 \frac{\sqrt{3}}{12} V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{12} V_{dc}$	90°
2	3	1	$\overrightarrow{V_{s39}}$				
1	2	0	$\overrightarrow{V_{s40}}$				
2	4	2	$\overrightarrow{V_{s41}}$	$-\frac{2}{12} V_{dc}$	$2 \frac{\sqrt{3}}{12} V_{dc}$	$\frac{\sqrt{16}}{12} V_{dc}$	120°
1	3	1	$\overrightarrow{V_{s42}}$				
0	2	0	$\overrightarrow{V_{s43}}$				
2	4	3	$\overrightarrow{V_{s44}}$	$-\frac{3}{12} V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{12} V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{12} V_{dc}$	150°
1	3	2	$\overrightarrow{V_{s45}}$				
0	2	1	$\overrightarrow{V_{s46}}$				
2	4	4	$\overrightarrow{V_{s47}}$	$-\frac{4}{12} V_{dc}$	$0 V_{dc}$	$\frac{4}{12} V_{dc}$	180°
1	3	3	$\overrightarrow{V_{s48}}$				
0	2	2	$\overrightarrow{V_{s49}}$				
2	3	4	$\overrightarrow{V_{s50}}$	$-\frac{3}{12} V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12} V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{12} V_{dc}$	210°
1	2	3	$\overrightarrow{V_{s51}}$				
0	1	2	$\overrightarrow{V_{s52}}$				

2	2	4	$\overrightarrow{V_{s53}}$	$-\frac{2}{12}V_{dc}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{16}}{12}V_{dc}$	240°
1	1	3	$\overrightarrow{V_{s54}}$				
0	0	2	$\overrightarrow{V_{s55}}$				
3	2	4	$\overrightarrow{V_{s56}}$	$0V_{dc}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{12}V_{dc}$	270°
2	1	3	$\overrightarrow{V_{s57}}$				
1	0	2	$\overrightarrow{V_{s58}}$				
4	2	4	$\overrightarrow{V_{s59}}$	$\frac{2}{12}V_{dc}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{16}}{12}V_{dc}$	300°
3	1	3	$\overrightarrow{V_{s60}}$				
2	0	2	$\overrightarrow{V_{s61}}$				
4	2	3	$\overrightarrow{V_{s62}}$	$\frac{3}{12}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{12}}{12}V_{dc}$	330°
3	1	2	$\overrightarrow{V_{s63}}$				
2	0	1	$\overrightarrow{V_{s64}}$				
4	1	1	$\overrightarrow{V_{s65}}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	0°
3	0	0	$\overrightarrow{V_{s66}}$				
4	2	1	$\overrightarrow{V_{s67}}$	$\frac{5}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	20°
3	1	0	$\overrightarrow{V_{s68}}$				
4	3	1	$\overrightarrow{V_{s69}}$	$\frac{4}{12}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	40°
3	2	0	$\overrightarrow{V_{s70}}$				
4	4	1	$\overrightarrow{V_{s71}}$	$\frac{3}{12}V_{dc}$	$3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	60°
3	3	0	$\overrightarrow{V_{s72}}$				
3	4	1	$\overrightarrow{V_{s73}}$	$\frac{1}{12}V_{dc}$	$3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	80°
2	3	0	$\overrightarrow{V_{s74}}$				
2	4	1	$\overrightarrow{V_{s75}}$	$-\frac{1}{12}V_{dc}$	$3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	100°
1	3	0	$\overrightarrow{V_{s76}}$				
1	4	1	$\overrightarrow{V_{s77}}$	$-\frac{3}{12}V_{dc}$	$3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	120°
0	3	0	$\overrightarrow{V_{s78}}$				
1	4	2	$\overrightarrow{V_{s79}}$	$-\frac{4}{12}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	140°
0	3	1	$\overrightarrow{V_{s80}}$				

1	4	3	$\overrightarrow{V_{s81}}$	$-\frac{5}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	160°
0	3	2	$\overrightarrow{V_{s82}}$				
1	4	4	$\overrightarrow{V_{s83}}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	180°
0	3	3	$\overrightarrow{V_{s84}}$				
1	3	4	$\overrightarrow{V_{s85}}$	$-\frac{5}{12}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	200°
0	2	3	$\overrightarrow{V_{s86}}$				
1	2	4	$\overrightarrow{V_{s87}}$	$-\frac{4}{12}V_{dc}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	220°
0	1	3	$\overrightarrow{V_{s88}}$				
1	1	4	$\overrightarrow{V_{s89}}$	$-\frac{3}{12}V_{dc}$	$-3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	240°
0	0	3	$\overrightarrow{V_{s90}}$				
2	1	4	$\overrightarrow{V_{s91}}$	$-\frac{1}{12}V_{dc}$	$-3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	260°
1	0	3	$\overrightarrow{V_{s92}}$				
3	1	4	$\overrightarrow{V_{s93}}$	$\frac{1}{12}V_{dc}$	$-3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	280°
2	0	3	$\overrightarrow{V_{s94}}$				
4	1	4	$\overrightarrow{V_{s95}}$	$\frac{3}{12}V_{dc}$	$-3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	300°
3	0	3	$\overrightarrow{V_{s96}}$				
4	1	3	$\overrightarrow{V_{s97}}$	$-\frac{4}{12}V_{dc}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	320°
3	0	2	$\overrightarrow{V_{s98}}$				
4	1	2	$\overrightarrow{V_{s99}}$	$-\frac{5}{12}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{28}}{12}V_{dc}$	340°
3	0	1	$\overrightarrow{V_{s100}}$				
4	0	0	$\overrightarrow{V_{s101}}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	0°
4	1	0	$\overrightarrow{V_{s102}}$	$\frac{7}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	15°
4	2	0	$\overrightarrow{V_{s103}}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	$2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{48}}{12}V_{dc}$	30°
4	3	0	$\overrightarrow{V_{s104}}$	$\frac{5}{12}V_{dc}$	$3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	45°
4	4	0	$\overrightarrow{V_{s105}}$	$\frac{4}{12}V_{dc}$	$4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{8}{12}V_{dc}$	60°
3	4	0	$\overrightarrow{V_{s106}}$	$\frac{2}{12}V_{dc}$	$4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	75°
2	4	0	$\overrightarrow{V_{s107}}$	$0V_{dc}$	$4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{48}}{12}V_{dc}$	90°

1	4	0	$\overrightarrow{V_{s108}}$	$-\frac{2}{12}V_{dc}$	$-4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	105°
0	4	0	$\overrightarrow{V_{s109}}$	$-\frac{4}{12}V_{dc}$	$-4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{8}{12}V_{dc}$	120°
0	4	1	$\overrightarrow{V_{s110}}$	$-\frac{5}{12}V_{dc}$	$-3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	135°
0	4	2	$\overrightarrow{V_{s111}}$	$-\frac{6}{12}V_{dc}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{48}}{12}V_{dc}$	150°
0	4	3	$\overrightarrow{V_{s112}}$	$-\frac{7}{12}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	165°
0	4	4	$\overrightarrow{V_{s113}}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$0V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	180°
0	3	4	$\overrightarrow{V_{s114}}$	$-\frac{7}{12}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	195°
0	2	4	$\overrightarrow{V_{s115}}$	$-\frac{6}{12}V_{dc}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{48}}{12}V_{dc}$	210°
0	1	4	$\overrightarrow{V_{s116}}$	$-\frac{5}{12}V_{dc}$	$-3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	225°
0	0	4	$\overrightarrow{V_{s117}}$	$-\frac{4}{12}V_{dc}$	$-4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{8}{12}V_{dc}$	240°
1	0	4	$\overrightarrow{V_{s118}}$	$-\frac{2}{12}V_{dc}$	$-4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	255°
2	0	4	$\overrightarrow{V_{s119}}$	$0V_{dc}$	$-4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{48}}{12}V_{dc}$	270°
3	0	4	$\overrightarrow{V_{s120}}$	$\frac{2}{12}V_{dc}$	$-4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	285°
4	0	4	$\overrightarrow{V_{s121}}$	$\frac{4}{12}V_{dc}$	$-4\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{8}{12}V_{dc}$	300°
4	0	3	$\overrightarrow{V_{s122}}$	$\frac{5}{12}V_{dc}$	$-3\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	315°
4	0	2	$\overrightarrow{V_{s123}}$	$\frac{6}{12}V_{dc}$	$-2\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{48}}{12}V_{dc}$	330°
4	0	1	$\overrightarrow{V_{s124}}$	$\frac{7}{12}V_{dc}$	$-\frac{\sqrt{3}}{12}V_{dc}$	$\frac{\sqrt{52}}{12}V_{dc}$	345°

Tabla A.4: Estados de conmutación y vectores de tensión para inversor trifásico 5-niveles.

Bibliografía

- [1] T. Noguchi and I. Takahashi, “Quick torque response control of an induction motor based on a new concept,” in *IEEE Tech. Meeting Rotating Mach*, pp. 61–70, 1984.
- [2] I. Takahashi and T. Noguchi, “A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor,” *IEEE Transactions on Industry applications*, no. 5, pp. 820–827, 1986.
- [3] I. Takahashi and Y. Ohmori, “High-performance direct torque control of an induction motor,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 257–264, 1989.
- [4] J. M. Maciejowski, *Predictive control: with constraints*. Pearson education, 2002.
- [5] D. E. Seborg, D. A. Mellichamp, T. F. Edgar, and F. J. Doyle III, *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2010.
- [6] R. Kennel and A. Linder, “Predictive control of inverter supplied electrical drives,” in *Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual*, vol. 2, pp. 761–766, IEEE, 2000.
- [7] S. Kouro, M. A. Perez, J. Rodriguez, A. M. Llor, and H. A. Young, “Model predictive control: Mpc’s role in the evolution of power electronics,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 8–21, 2015.
- [8] S. Vazquez, J. Rodriguez, M. Rivera, L. G. Franquelo, and M. Norambuena, “Model predictive control for power converters and drives: Advances and trends,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 935–947, 2017.

- [9] S. Vazquez, J. I. Leon, L. G. Franquelo, J. Rodriguez, H. A. Young, A. Marquez, and P. Zanchetta, "Model predictive control: A review of its applications in power electronics," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 16–31, 2014.
- [10] P. Vaclavek and P. Blaha, "Pmsm model discretization for model predictive control algorithms," in *System Integration (SII), 2013 IEEE/SICE International Symposium on*, pp. 13–18, IEEE, 2013.
- [11] P. Stolze, P. Landsmann, R. Kennel, and T. Mouton, "Finite-set model predictive control with heuristic voltage vector preselection for higher prediction horizons," in *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, pp. 1–9, IEEE, 2011.
- [12] P. Cortés, S. Kouro, B. La Rocca, R. Vargas, J. Rodríguez, J. I. León, S. Vazquez, and L. G. Franquelo, "Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives," in *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on*, pp. 1–7, IEEE, 2009.
- [13] P. Cortes, A. Wilson, S. Kouro, J. Rodriguez, and H. Abu-Rub, "Model predictive control of multilevel cascaded h-bridge inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2691–2699, 2010.
- [14] M. Habibullah, D. D.-C. Lu, D. Xiao, and M. F. Rahman, "A simplified finite-state predictive direct torque control for induction motor drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3964–3975, 2016.
- [15] T. Geyer, G. Papafotiou, and M. Morari, "Model predictive direct torque control—part i: Concept, algorithm, and analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 1894–1905, 2009.
- [16] G. Papafotiou, J. Kley, K. G. Papadopoulos, P. Bohren, and M. Morari, "Model predictive direct torque control—part ii: Implementation and experimental evaluation," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 1906–1915, 2009.

- [17] T. Geyer and S. Mastellone, "Model predictive direct torque control of a five-level anpc converter drive system," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, pp. 363–370, IEEE, 2011.
- [18] G. Cimini, D. Bernardini, A. Bemporad, and S. Levijoki, "Online model predictive torque control for permanent magnet synchronous motors," in *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 2308–2313, IEEE, 2015.
- [19] Y. Cho, K.-B. Lee, J.-H. Song, and Y. I. Lee, "Torque-ripple minimization and fast dynamic scheme for torque predictive control of permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 4, pp. 2182–2190, 2015.
- [20] M. Preindl, E. Schaltz, and P. Thogersen, "Switching frequency reduction using model predictive direct current control for high-power voltage source inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2826–2835, 2011.
- [21] T. Laczynski and A. Mertens, "Predictive stator current control for medium voltage drives with lc filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 11, pp. 2427–2435, 2009.
- [22] F. Barrero, M. R. Arahall, R. Gregor, S. Toral, and M. J. Durán, "One-step modulation predictive current control method for the asymmetrical dual three-phase induction machine," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 1974–1983, 2009.
- [23] M. Arahall, F. Barrero, S. Toral, M. Duran, and R. Gregor, "Multi-phase current control using finite-state model-predictive control," *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 5, pp. 579–587, 2009.
- [24] S. A. Davari, D. A. Khaburi, F. Wang, and R. M. Kennel, "Using full order and reduced order observers for robust sensorless predictive torque control of induction motors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 7, pp. 3424–3433, 2012.
- [25] M. Preindl and E. Schaltz, "Sensorless model predictive direct current control using novel second-order pll observer for pmsm drive systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4087–4095, 2011.

- [26] J. Rodríguez, R. M. Kennel, J. R. Espinoza, M. Trincado, C. A. Silva, and C. A. Rojas, "High-performance control strategies for electrical drives: An experimental assessment," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 812–820, 2012.
- [27] G. Papafotiou, T. Geyer, and M. Morari, "Optimal direct torque control of three-phase symmetric induction motors," *Atlantis*, 2004.
- [28] R. Vargas, P. Cortés, U. Ammann, J. Rodríguez, and J. Pontt, "Predictive control of a three-phase neutral-point-clamped inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 2697–2705, 2007.
- [29] P. Lezana, R. Aguilera, and D. E. Quevedo, "Model predictive control of an asymmetric flying capacitor converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 1839–1846, 2009.
- [30] S. Kouro, P. Cortés, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodríguez, "Model predictive control—a simple and powerful method to control power converters," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 1826–1838, 2009.
- [31] J. Rodriguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés, and U. Ammann, "Predictive current control of a voltage source inverter," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 495–503, 2007.
- [32] R. P. Aguilera and D. E. Quevedo, "On stability and performance of finite control set mpc for power converters," in *Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), 2011 Workshop on*, pp. 55–62, IEEE, 2011.
- [33] T. Geyer, "Generalized model predictive direct torque control: Long prediction horizons and minimization of switching losses," in *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on*, pp. 6799–6804, IEEE, 2009.

- [34] J. Rodriguez, M. P. Kazmierkowski, J. R. Espinoza, P. Zanchetta, H. Abu-Rub, H. A. Young, and C. A. Rojas, "State of the art of finite control set model predictive control in power electronics," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 1003–1016, 2013.
- [35] C. Krause Paul, W. Oleg, and D. Sudhoff Scott, *Analysis of electric machinery and drive systems*. IEEE Press, Willy Interscience, 2004.